



TUGAS AKHIR - TF 141581

**OPTIMISASI DESAIN *PRESSURE SWING*
ADSORPTION SEBAGAI *CARBON CAPTURE*
PADA STUDI KASUS PLTU PAITON DAN PLTG
MUARA TAWAR**

KEVIN SANJOYO GUNAWAN
NRP. 2413 100 035

Dosen Pembimbing
Totok Ruki Biyanto, Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TF 141581

***DESIGN OPTIMIZATION PRESSURE SWING
ADSORPTION AS CARBON CAPTURE IN
PAITON AND PLTG MUARA TAWAR***

KEVIN SANJOYO GUNAWAN
NRP. 2413 100 035

Advisor Lecturer
Totok Ruki Biyanto, Ph.D.

DEPARTEMEN OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017


PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Kevin Sanjoyo Gunawan
NRP : 2413100035
Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya yang berjudul “OPTIMISASI DESAIN *PRESSURE SWING ADSORPTION* SEBAGAI *CARBON CAPTURE* PADA STUDI KASUS PLTU PAITON DAN PLTG MUARA TAWAR” adalah bebas plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku. Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 18 Juli 2017
Yang membuat pernyataan,



Kevin Sanjoyo Gunawan

LEMBAR PENGESAHAN
OPTIMISASI DESAIN *PRESSURE SWING ADSORPTION*
SEBAGAI *CARBON CAPTURE* PADA STUDI KASUS
PLTU PAITON DAN PLTG MUARA TAWAR

TUGAS AKHIR

Oleh
Kevin Sanjoyo Gunawan
NRP 2413 100 035

Surabaya. 20 Juli 2017
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing



Totok Ruki Biyanto, Ph.D.
NIP. 19710702 199802 1 001

Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



Arda Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN 19780902 200312 1 002

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMISASI DESAIN PRESSURE SWING ADSORPTION SEBAGAI CARBON CAPTURE PADA STUDI KASUS PLTU PAITON DAN PLTG MUARA TAWAR

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Oleh:

KEVIN SANJOYO GUNAWAN

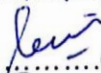
NRP. 2413 100 035

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:


1. Totok Ruki Biyanto, Ph.D.

.....(Pembimbing)


2. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.

.....(Ketua Penguji)

3. Hendra Cordova, S.T., M.T.

.....(Penguji I)

4. Bagus Tri Atmaja, S.T., M.T.

.....(Penguji II)

SURABAYA

Juli 2017

OPTIMISASI DESAIN *PRESSURE SWING ADSORPTION* SEBAGAI *CARBON CAPTURE* PADA STUDI KASUS PLTU PAITON DAN PLTG MUARA TAWAR

Nama Mahasiswa : Kevin Sanjoyo Gunawan
NRP : 2413 100 035
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Totok Ruki Biyanto, Ph.D.

Abstrak

Salah satu gas rumah kaca yang ditimbulkan akibat pembakaran adalah karbon dioksida. Emisi karbon dioksida terbesar salah satunya berasal dari proses pembakaran pada industri pembangkit listrik. Untuk mencegah pemanasan global lebih lanjut maka perlu dilakukan penelitian mengenai teknologi penangkapan karbon dioksida pada gas buang pembangkit listrik. Keuntungan yang didapatkan dalam penangkapan karbon dioksida selain dalam pengurangan emisi adalah keuntungan dari segi ekonomi. Karbon dioksida dapat dijual untuk memenuhi kebutuhan industri lain seperti industri makanan dan minuman, hingga industri minyak. Karena adanya keuntungan dalam pengurangan emisi gas rumah kaca hingga keuntungan dalam segi ekonomi, maka penangkapan karbon dioksida pada industri pembangkit listrik saat ini perlu dipertimbangkan. Pada penelitian ini dianalisa penangkapan karbon dioksida pada PLTU Paiton dan PLTG Muara Tawar dengan menggunakan strategi dekarbonisasi pasca-pembakaran *pressure swing adsorption*. *Pressure swing adsorption* merupakan teknologi pemisahan gas yang umum digunakan karena teknologi ini lebih murah dibanding teknologi pemisahan gas lain. Telah didapat desain *pressure swing adsorption* yang optimal terhadap penyerapan karbon dioksida dari segi ekonomi. Keuntungan terbesar didapat dengan menggunakan zeolite 13x pada kedua studi kasus. Pada desain *pressure swing adsorption* untuk studi kasus PLTG Muara Tawar didapat keuntungan sebesar 243,071,316 USD ketika menggunakan zeolite 13x dengan waktu adsorpsi 90 detik, tekanan adsorpsi 1.1 atm dan panjang serta diameter kolom berturut-turut adalah 2 dan 4 meter. Sedangkan pada desain *pressure swing adsorption* untuk studi kasus PLTU Paiton diperoleh keuntungan sebesar 356,627,026 USD pada penggunaan zeolite 13x dengan waktu adsorpsi 83 detik, tekanan adsorpsi 1 atm, dan panjang serta diameter kolom berturut-turut adalah 2 dan 4 meter.

Kata Kunci: carbon capture, dekarbonisasi pasca pembakaran, pressure swing adsorption

DESIGN OPTIMIZATION PRESSURE SWING ADSORPTION AS CARBON CAPTURE IN PAITON AND PLTG MUARA TAWAR

Name : Kevin Sanjoyo Gunawan
NRP : 2413 100 035
Program Study : Engineering Physics
Advisor : Totok Ruki Biyanto, Ph.D.

Abstract

One of the greenhouse gases induced by combustion is carbon dioxide. The largest carbon dioxide emissions are from burning process in power generation. To prevent further global warming, research on carbon capture technology in power plant exhaust gases is needed. In addition to emissions reductions, the benefits gained in carbon dioxide capture are economic benefits. Carbon dioxide can be sold to meet the needs of other industries such as food and beverage industry, and oil industry. Due to the advantages of reducing greenhouse gas emissions to economic benefits, the capture of carbon dioxide in today's power generation industries needs to be considered. In this study, carbon capture in PLTU Paiton and PLTG Muara Tawar by using post-combustion strategy with pressure swing adsorption is analyzed. Pressure swing adsorption is a common used because this technology is cheaper than other gas separation technologies. An optimum pressure swing adsorption design has been obtained for carbon dioxide adsorption by using 13x zeolite in both case studies. In the design of pressure swing adsorption for PLTG Muara Tawar case study there was a profit of 243,071,316 USD when using 13x zeolite with 90 second adsorption time, the adsorption pressure of 1.1 atm and the length and diameter of columns were 2 and 4 meters respectively. While the design of pressure swing adsorption for PLTU Paiton case study was obtained 356,627,026 USD in 13x zeolite usage with adsorption time 83 seconds, adsorption pressure 1 atm, length and diameter of column respectively are 2 and 4 meters

Keyword: carbon capture, post-combustion, pressure swing adsorption

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini. Tidak lupa juga penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada keluarga dan para sahabat. Oleh karena dukungan mereka, penulis mampu menyusun laporan tugas akhir yang berjudul:

“OPTIMISASI DESAIN *PRESSURE SWING ADSORPTION* SEBAGAI *CARBON CAPTURE* PADA STUDI KASUS PLTU PAITON DAN PLTG MUARA TAWAR”

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam Program Studi S-1 Teknik Fisika FTI-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar besarnya kepada:

1. Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku ketua jurusan Teknik Fisika ITS.
2. Totok Ruki Biyanto, Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir ini.
3. Ir Tutug Dhanardono M.T. selaku dosen wali penulis.
4. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di jurusan Teknik Fisika - ITS.
5. Rekan – rekan Teknik Fisika yang memberikan bantuan dalam penyelesaian laporan tugas akhir.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya.

Surabaya, 5 Juni 2017
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
Abstrak	xi
<i>Abstract</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan	4
1.4. Lingkup Kerja	4
1.5. Sistematika Laporan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Stoikiometri	7
2.1.1 Konsep Mol	7
2.1.2 Perhitungan Reaksi Kimia	8
2.2. Bahan Bakar	8
2.2.1. Batu bara	9
2.2.2. Gas Alam	10
2.3. <i>Carbon Capture</i>	10
2.4. <i>Pressure Swing Adsorption</i>	11
2.5. Persamaan Ergun	13
2.6. Viskositas	14
2.7. <i>Genetic Algorithm</i>	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1. Studi Literatur	17

3.2. Pengumpulan Data Energi dan Emisi Karbon Dioksida...	18
3.3. Perhitungan Stoikiometri Pembakaran	18
3.4. Pemodelan <i>Pressure Swing Adsorption</i>	19
3.5. Penentuan Fungsi Tujuan	24
3.6. Optimisasi Desain menggunakan <i>Genetic Algorithm</i>	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1. Analisa Properti Gas Buang	27
4.2. Hasil Pemodelan <i>Pressure Swing Adsorption</i>	28
4.3. Pemodelan <i>Adsorbent</i>	31
4.4. Perhitungan Biaya	36
4.5. Optimisasi <i>Plant</i>	39
BAB V PENUTUP	43
5.1 Kesimpulan.....	43
5.2 Saran.....	44
DAFTAR PUSTAKA	45
LAMPIRAN	47

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. <i>Pressure Swing Adsorption</i> sebagai Penangkapan Karbon Dioksida	12
Gambar 2. 2. Flowchart <i>Genetic Algorithm</i>	15
 Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian.....	17
Gambar 3. 2. Skema <i>Pressure Swing Adsorption</i> dengan Proses Adsorpsi dan Desorpsi.....	19
 Gambar 4. 1. Grafik Hubungan Antara Kecepatan Gas dengan Luas Penampang pada Kolom dengan Panjang 2 Meter	29
Gambar 4. 2. Grafik Hubungan Antara Waktu Adsorpsi dengan Kecepatan Gas pada Panjang Kolom Konstan (2 meter)	30
Gambar 4. 3. Grafik Hubungan Antara <i>Pressure Drop</i> dengan Kecepatan Gas pada Kolom Adsorpsi Studi Kasus PLTU Paiton	31
Gambar 4. 4. Grafik Hubungan Antara Tekanan Gas yang Melewati <i>Adsorbent</i> dengan Kemampuan Penyerapan CO ₂ pada Zeolite 4a.....	32
Gambar 4. 5. Grafik Hubungan Antara Tekanan Gas yang Melewati <i>Adsorbent</i> dengan Kemampuan Penyerapan CO ₂ pada Zeolite 5a.....	34
Gambar 4. 6. Grafik Hubungan Antara Tekanan Gas yang Melewati <i>Adsorbent</i> dengan Kemampuan Penyerapan CO ₂ pada Zeolite 13x.....	35
Gambar 4. 7. Hubungan Antara Luas Penampang dengan Harga Pembelian <i>Pressure Swing Adsorption</i>	37
Gambar 4. 8. Hubungan Antara Daya yang Dibutuhkan untuk Mendorong Gas dengan <i>Pressure Drop</i> yang Terjadi.....	38
Gambar 4. 9. Hubungan Antara Daya yang Dibutuhkan dengan Biaya Operasional	39

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. HHV dan LHV Beberapa Bahan Bakar	9
Tabel 3. 1. Listrik dan Emisi Karbon Dioksida yang Dihasilkan pada PLTG Muara Tawar dan PLTU Paiton.....	18
Tabel 3. 2. Hasil Perhitungan Stoikiometri Pembakaran pada PLTG Muara Tawar dan PLTU Paiton.	19
Tabel 3. 3. Tipe <i>Adsorbent</i> yang Digunakan.....	20
Tabel 3. 4. Tipe <i>Adsorbent</i> yang Digunakan Beserta Properti Fisiknya	24
Tabel 4. 1. Perhitungan Massa CO ₂ Menggunakan Faktor Emisi dan Stoikiometri	27
Tabel 4. 2. Hasil Perhitungan Stoikiometri untuk Massa CO ₂ dan Massa N ₂ pada Gas Buang	27
Tabel 4. 3. Properti Gas pada <i>Pressure Swing Adsorption</i>	28
Tabel 4. 4. Data Kemampuan Penyerapan CO ₂ pada Tekanan yang Bervariasi.....	31
Tabel 4. 5. Nilai Penyerapan CO ₂ Menggunakan Persamaan Regresi pada Zeolite 4a	33
Tabel 4. 6. Nilai Penyerapan CO ₂ Menggunakan Persamaan Regresi pada Zeolite 5a	34
Tabel 4. 7. Nilai Penyerapan CO ₂ Menggunakan Persamaan Regresi pada Zeolite 13x	36
Tabel 4. 8 Hasil Optimisasi pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar dan PLTU Paiton dengan Menggunakan 3 <i>Adsorbent</i>	40

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanasan global adalah suatu proses meningkatnya suhu rata-rata atmosfer, laut, dan permukaan bumi. Salah satu penyebab pemanasan global adalah adanya efek rumah kaca yang disebabkan oleh gas-gas rumah kaca. Sebagian besar gas-gas rumah kaca timbul dari aktivitas manusia seperti pembakaran bahan bakar minyak, batu bara, atau bahan bakar organik lainnya. Salah satu gas rumah kaca yang ditimbulkan akibat pembakaran adalah karbon dioksida. Emisi karbon dioksida terbesar salah satunya berasal dari proses pembakaran pada industri pembangkit listrik. Untuk mencegah pemanasan global lebih lanjut maka perlu dilakukan penelitian mengenai teknologi penangkapan karbon dioksida pada gas buang pembangkit listrik.

Strategi yang umum digunakan dalam penangkapan karbon dioksida pada pembangkit listrik dapat dikelompokkan menjadi tiga (Leung, Caramana, & Maroto-Valer, 2014) yaitu dekarbonisasi pasca-pembakaran, dekarbonisasi pra-pembakaran, dan siklus *oxy-fuel*.

Masing-masing strategi memiliki beberapa keuntungan dan kerugian. Dekarbonisasi pasca-pembakaran merupakan metode pemisahan karbon dioksida pada gas buang. Pada proses ini jumlah gas buang yang harus diproses untuk dipisahkan dari karbon dioksida sangat besar karena karbon dioksida pada gas buang bercampur dengan nitrogen yang masuk bersama dalam udara pembakaran. Sebagai upaya peningkatkan proses penyerapan dengan konsumsi energi yang lebih rendah dan kecepatan reaksi yang tepat, banyak dilakukan penelitian dalam pengembangan adsorbent baru dan optimisasi pada operasi kolom penyerapan.

Pada dekarbonisasi pra pembakaran terjadi proses konversi bahan bakar menjadi karbon dioksida dan gas hidrogen. Gas hidrogen digunakan sebagai bahan bakar sedangkan karbon dioksida yang dihasilkan dari siklus ini dipisahkan (Corradetti &

Desideri, 2005). Pemisahan karbon dioksida pada siklus ini umumnya menggunakan absorpsi secara fisika maupun kimia.

Siklus *oxy-fuel* merupakan proses pembakaran pada bahan bakar dengan menggunakan oksigen. Pembakaran yang dilakukan tanpa adanya nitrogen dalam jumlah besar akan menghasilkan gas buang yang terdiri dari karbon dioksida dan uap air saja. Gas buang yang diproses untuk pemisahan karbon dioksida menjadi lebih sedikit karena tidak terdapat nitrogen. Pemisahan karbon dioksida dapat dilakukan dengan mengkondensasi air dari gas buang sehingga siklus ini hanya membutuhkan sedikit energi. Namun sebesar 7 hingga 10% energy dari sistem diperlukan untuk pemisahan oksigen dari udara (Zhang & Lior, 2008).

Strategi dalam pengurangan karbon dioksida yang telah disebutkan, selain mengurangi emisi karbon dioksida juga memiliki keuntungan lain. Karbon dioksida yang ditangkap dapat digunakan untuk keperluan lain mulai dari pengelasan, bahan baku dalam industri makanan dan minuman hingga penggunaan karbon dioksida pada industri minyak. Pada industri minyak karbon dioksida yang ditangkap dapat digunakan sebagai fluida injeksi pada sumur minyak. Penggunaan karbon dioksida sebagai fluida injeksi ini dapat meningkatkan produksi minyak pada sumur minyak. Peningkatan produksi minyak dapat terjadi karena karbon dioksida dapat mendorong minyak yang terdapat di dalam batuan yang tidak dapat didorong oleh air. Proses ini dikenal dengan nama *Enhanced Oil Recovery* (EOR) (Sheng, 2011).

Pada penelitian ini dilakukan analisa penangkapan karbon dioksida pada PLTU Paiton dan PLTG Muara Tawar dengan menggunakan strategi dekarbonisasi pasca-pembakaran. Strategi ini dipilih karena secara umum dapat diterapkan langsung pada pembangkit listrik yang sudah ada. Teknologi yang digunakan untuk penangkapan karbon adalah *pressure swing adsorption*. *Pressure swing adsorption* merupakan teknologi pemisahan gas yang umum digunakan karena teknologi ini lebih murah dibanding teknologi pemisahan gas lain. Walaupun proses pengadaan teknologi lebih murah, penentuan kondisi operasi *pressure swing adsorption* seperti tekanan adsorpsi yang digunakan, volume

kolom, dan lama waktu terjadinya penyerapan gas (*adsorption time*) yang tidak tepat dapat menyebabkan kerugian dari sisi penjualan karbon dioksida karena biaya operasional yang lebih tinggi. Oleh sebab itu pada penggunaan *pressure swing adsorption* untuk penangkapan karbon dioksida harus dengan kondisi operasional yang optimal agar diperoleh keuntungan maksimal.

Pada penelitian Ko dkk membahas mengenai hubungan kondisi operasi *pressure swing adsorption* yang meliputi waktu adsorpsi dan ukuran kolom terhadap jumlah karbon dioksida yang diserap namun pada penelitian ini tidak dibahas mengenai keuntungan dari penjualan karbon dioksida (Ko, Siriwardane, & Biegler, 2005). Pada penelitian Pirngruber dkk membahas mengenai hubungan kecepatan gas pada kolom dan kondisi operasional lain pada *pressure swing adsorption* terhadap jumlah karbon dioksida yang diserap namun penelitian ini tidak membahas mengenai keuntungan dari segi ekonomi (Pirngruber & Leinekugel-le-Cocq, 2013). Pada penelitian yang dilakukan oleh Susarla dkk membahas mengenai model matematis dalam penentuan harga kolom *pressure swing adsorption* namun tidak membahas penerapannya dalam suatu studi kasus (Susarla, et al., 2015).

Dengan dilakukannya desain kondisi yang optimal untuk proses *pressure swing adsorption* pada penelitian ini diharapkan selain dapat mengoptimalkan penyerapan karbon dioksida pada PLTU Paiton dan PLTG Muara Tawar, juga dapat mengoptimalkan keuntungan secara ekonomis dalam penjualan karbon dioksida dan meminimalisir biaya yang dibutuhkan dalam pengadaan dan operasional *pressure swing adsorption*.

1.2. Rumusan Masalah

Desain teknologi penangkapan karbon dioksida menggunakan proses *post-combustion* pada PLTG Muara Tawar dan PLTU Paiton ini memerlukan perhitungan jumlah massa pada tiap komponen zat dalam reaksi pembakaran untuk menentukan komponen zat yang dibutuhkan dalam pembakaran dan komponen zat buang. Hasil perhitungan ini diperlukan untuk menentukan

kondisi operasi (tekanan, lebar dan tinggi kolom) yang optimal pada *pressure swing adsorption* agar diperoleh keuntungan maksimal dari penggunaan teknologi ini. Dari masalah tersebut didapat rumusan masalah yakni bagaimana merancang desain *pressure swing adsorption* yang optimal terhadap penyerapan karbon dioksida dari segi ekonomi dan bagaimana pengaruh kondisi operasional *pressure swing adsorption* terhadap keuntungan ekonomi yang didapatkan berdasarkan penjualan karbon dioksida.

1.3. Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini yaitu:

- Menentukan desain *pressure swing adsorption* yang optimal terhadap penyerapan karbon dioksida dari segi ekonomi.
- Menganalisa pengaruh kondisi operasional *pressure swing adsorption* terhadap keuntungan yang didapatkan berdasarkan penjualan karbon dioksida.

1.4. Lingkup Kerja

Hal-hal yang dilakukan dalam penelitian ini antara lain: analisa komponen *flue gas* yang didapat dari pembakaran bahan bakar pada PLTG Muara Tawar dan PLTU Paiton dengan menggunakan stoikiometri, menentukan kondisi operasional yang optimum dalam memperoleh keuntungan dari penjualan karbon dioksida. Variabel yang di optimisasi meliputi ukuran kolom, tekanan adsorpsi, dan waktu yang digunakan pada tahap adsorpsi, dan menentukan keuntungan berdasarkan penjualan karbon dioksida dan memperkecil CAPEX yang terdiri dari biaya yang dibutuhkan pada pengadaan modul *pressure swing adsorption* berdasarkan ukuran kolom, dan massa *adsorbent* yang dibutuhkan serta memperkecil OPEX yang terdiri biaya listrik yang dibutuhkan *blower*, *compressor* dan *vacuum pump*.

1.5. Sistematika Laporan

Secara sistematis, laporan tugas akhir ini tersusun dalam lima bab, dengan penjelasan sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, lingkup kerja, dan sistematika laporan dari tugas akhir.

BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi tentang teori-teori yang mendasari penelitian. Teori-teori tersebut diantaranya meliputi stoikiometri, *carbon capture*, *pressure swing adsorption*, bahan bakar yang digunakan, persamaan Ergun, viskositas, serta teknik optimasi yang digunakan.

BAB III Metodologi Penelitian

Pada bab ini dijelaskan tentang langkah-langkah dan tahapan penelitian dimulai dari diagram alir penelitian, studi literatur, pengumpulan data energi dan emisi CO₂, perhitungan kesetimbangan massa dalam pembakaran, desain *pressure swing adsorption*, penentuan fungsi objektif, serta optimasi fungsi objektif yang didapat menggunakan metode *genetic algorithm*.

BAB IV Hasil dan Pembahasan

Bab ini menunjukkan desain *plant*, optimisasi yang dilakukan, beserta analisis, dan pembahasan yang telah diperoleh selama pengerjaan penelitian.

BAB V Kesimpulan dan Saran

Bab ini memaparkan kesimpulan dan saran terkait dengan tugas akhir yang telah dilaksanakan.

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Stoikiometri

Stoikiometri secara konvensional merupakan suatu metode yang menjelaskan hubungan jumlah bahan dalam reaktan maupun produk pada reaksi kimia. Perhitungan pada stoikiometri tidak terbatas pada penyetaraan reaksi kimia saja namun dapat mencakup kesetimbangan energi pada proses (Narayanan & Lakshmikutty, 2006). Konsep stoikiometri didasarkan dari kesetimbangan massa dimana ketika salah satu bagian (reaktan atau produk) mempunyai nilai massa yang sudah diketahui maka jumlah bagian lain dapat dihitung.

Reaktan merupakan zat yang berperan dalam reaksi awal atau dapat disebut zat yang bereaksi. Reaktan umumnya ditulis pada sisi kiri persamaan reaksi kimia. Produk dalam stoikiometri merupakan zat baru yang terbentuk setelah reaksi. Produk dibentuk oleh reaksi antara reaktan, dan memiliki karakteristik yang berbeda dari reaktan. Produk mungkin memiliki energi yang lebih rendah atau energi yang lebih tinggi dibanding reaktan. Jumlah produk yang dihasilkan setelah reaksi ditentukan oleh jumlah reaktan yang digunakan, waktu, dan tingkat reaksi.

2.1.1 Konsep Mol

Mol menyatakan banyaknya partikel dalam suatu zat. Satu mol zat mengandung jumlah partikel yang sama dengan jumlah partikel dalam 12,0 gram isotop C-12 yakni $6,02 \times 10^{23}$ partikel. Jumlah mol suatu zat dapat digunakan untuk menentukan massa maupun volume zat tersebut (Narayanan & Lakshmikutty, 2006).

$$massa = n \times Mr \quad (2.1)$$

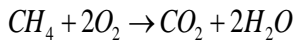
Dimana n menyatakan jumlah mol, dan Mr menyatakan massa molar dari zat terkait. Hubungan mol dengan volume dapat dinyatakan dengan rumus sebagai berikut

$$PV = nRT \quad (2.2)$$

Dimana P menyatakan tekanan, V menyatakan volume, n menyatakan jumlah mol, R menyatakan konstanta gas, dan T menyatakan temperatur.

2.1.2 Perhitungan Reaksi Kimia

Pada perhitungan reaksi kimia, perbandingan koefisien pada zat yang bereaksi dan zat hasil reaksi menunjukkan perbandingan jumlah partikel dan perbandingan volume (Narayanan & Lakshmikutty, 2006). Karena mol merupakan jumlah partikel dibagi bilangan Avogadro, maka perbandingan jumlah partikel dapat menyatakan perbandingan jumlah mol. Pada reaksi kimia pembakaran gas alam diperoleh reaksi kimia sebagai berikut



Pada reaksi pembakaran batubara diperoleh reaksi kimia sebagai berikut



2.2. Bahan Bakar

Bahan bakar adalah suatu materi apapun yang bisa diubah menjadi energi. Kebanyakan bahan bakar digunakan manusia melalui proses pembakaran (reaksi redoks) di mana bahan bakar tersebut akan melepaskan panas setelah direaksikan dengan oksigen di udara. Proses lain untuk melepaskan energi dari bahan bakar adalah melalui reaksi eksotermal dan reaksi nuklir (seperti Fisi nuklir atau Fusi nuklir). Hidrokarbon (termasuk di dalamnya bensin dan solar) sejauh ini merupakan jenis bahan bakar yang paling sering digunakan manusia (Glassman & Yetter, 2008).

Heating Value (nilai kalor) adalah total energi yang dilepaskan sebagai panas ketika zat mengalami pembakaran sempurna dengan oksigen dalam kondisi standar. Reaksi kimia

biasanya hidrokarbon atau molekul organik lainnya bereaksi dengan oksigen untuk membentuk karbon dioksida dan air dan melepaskan panas. Nilai kalor dari suatu zat, adalah jumlah panas yang dilepaskan selama pembakaran. Nilai kalor pada setiap zat berbeda. Hal ini diukur dalam satuan energi per unit dari zat, biasanya massa, seperti: kJ / kg, kJ / mol, kkal / kg, Btu / lb. Persamaan yang menyatakan hubungan kalor yang dihasilkan dengan nilai kalor dapat dituliskan sebagai berikut:

$$Q = m \times HHV \quad (2.3)$$

$$Q = m \times LHV \quad (2.4)$$

Dimana Q menunjukkan kalor yang dihasilkan, m menunjukkan massa bahan bakar, dan HHV/LHV menunjukkan *Higher Heating Value/Lower Heating Value* untuk bahan bakar. Berikut ini merupakan tabel nilai HHV dan LHV pada beberapa bahan bakar.

Tabel 2. 1. HHV dan LHV Beberapa Bahan Bakar (Glassman & Yetter, 2008)

Fuel	HHV MJ/kg	HHV BTU/lb	LHV MJ/kg	LHV BTU/lb
Hydrogen	142.18	61,127	120.21	51,682
Natural Gas	52.22	22,453	47.14	20,267
Propane	50.23	21,597	46.3	19,904
Butane	49.21	21,157	45.27	19,466
Coal	23.96	10,304	22.73	9,773
Bituminous Coal	-	-	32.25	13,840

2.2.1. Batu bara

Batu bara adalah salah satu bahan bakar fosil. Pengertian umumnya adalah batuan sedimen yang dapat terbakar, terbentuk dari endapan organik, utamanya adalah sisa-sisa tumbuhan dan

terbentuk melalui proses pembatubaraan. Unsur-unsur utamanya terdiri dari karbon, hidrogen dan oksigen.

Batu bara adalah batuan organik yang memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang kompleks yang dapat ditemui dalam berbagai bentuk. Analisis unsur memberikan rumus formula empiris seperti $C_{137}H_{97}O_9NS$ untuk bituminus dan $C_{240}H_{90}O_4NS$ untuk antrasit.

2.2.2. Gas Alam

Gas alam atau gas rawa, adalah bahan bakar fosil berbentuk gas yang terutama terdiri dari metana (CH_4). Gas alam dapat ditemukan di ladang minyak, ladang gas Bumi dan juga tambang batu bara. Ketika gas yang kaya dengan metana diproduksi melalui pembusukan oleh bakteri anaerobik dari bahan-bahan organik selain dari fosil, maka gas ini disebut biogas. Sumber biogas dapat ditemukan di rawa-rawa, tempat pembuangan akhir sampah, serta penampungan kotoran manusia dan hewan.

2.3. Carbon Capture

Carbon capture adalah proses menangkap limbah karbon dioksida dari sumber besar, seperti pembangkit listrik berbahan bakar fosil, dan membawanya ke sebuah lokasi penyimpanan. Tujuannya adalah untuk mencegah pelepasan karbon dioksida ke atmosfer dalam jumlah besar (dari penggunaan bahan bakar fosil di pembangkit listrik dan industri lainnya). *Carbon capture* merupakan metode yang potensial dalam mengurangi pengaruh emisi bahan bakar fosil pada pemanasan global dan pengasaman laut.

Karbon dioksida dapat ditangkap dari udara atau gas buang pembangkit listrik bahan bakar fosil menggunakan absorpsi (penggunaan MEA, karbon aktif, dll), pemisahan gas membran, teknologi adsorpsi, maupun *supersonic separation*.

Strategi untuk mengurangi emisi karbon dioksida ini dapat dikelompokkan menjadi tiga (Leung, Caramana, & Maroto-Valer, 2014) yaitu dekarbonisasi pasca-pembakaran, dekarbonisasi pra-pembakaran, dan siklus oxy-fuel

Dekarbonisasi pasca-pembakaran merupakan metode pemisahan karbon dioksida pada gas buang. Pada proses ini jumlah gas buang yang harus diproses untuk dipisahkan dari karbon dioksida sangat besar karena karbon dioksida pada gas buang bercampur dengan nitrogen yang masuk bersama dalam udara pembakaran. Sebagai upaya peningkatkan proses penyerapan dengan konsumsi energi yang lebih rendah dan kecepatan reaksi yang tepat, banyak dilakukan penelitian dalam pengembangan pelarut baru dan optimisasi komposisi pelarut serta optimisasi pada operasi kolom penyerapan.

Pada dekarbonisasi pra pembakaran terjadi proses konversi bahan bakar umumnya gas alam menjadi CO dan gas H₂. Pada akhirnya siklus ini akan menghasilkan bahan bakar hidrogen akibat perubahan CO menjadi karbon dioksida yang akhirnya dipisahkan (Corradetti & Desideri, 2005). Karena gas alam yang tidak terkonversi menyebabkan terbentuknya karbon dioksida dalam jumlah besar, maka diperlukan tingkat konversi yang tinggi. Tergantung pada kondisi operasionalnya, pemisahan karbon dioksida dapat menggunakan absorpsi secara fisika maupun kimia.

Siklus *oxy-fuel* didasarkan pada pendekatan stoikiometrik pembakaran, di mana bahan bakar dibakar dengan oksigen yang diperkaya (diproduksi oleh unit pemisahan udara). Pembakaran yang dilakukan tanpa adanya nitrogen dalam jumlah besar akan menghasilkan gas buang yang terdiri dari karbon dioksida dan uap air saja. Gas buang yang diproses untuk pemisahan karbon dioksida menjadi lebih sedikit karena tidak terdapat nitrogen. Pemisahan karbon dioksida dapat dilakukan dengan mengkondensasi air dari gas buang sehingga siklus ini hanya membutuhkan sedikit energi. Namun bagaimanapun juga, sebesar 7 hingga 10% energy dari sistem diperlukan untuk pemisahan oksigen dari udara (Zhang & Lior, 2008).

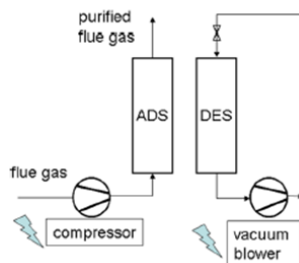
2.4. Pressure Swing Adsorption

Adsorpsi adalah suatu fenomena dimana molekul suatu fluida mengalami daya tarik ketika dekat dengan permukaan *adsorbent*. *Adsorbent* adalah zat padat yang berpori sehingga memiliki luas

permukaan yang besar per satuan massa. Molekul yang berbeda akan memiliki interaksi yang berbeda dengan permukaan *adsorbent* sehingga dengan pemilihan *adsorbent* yang tepat dapat dilakukan pemisahan molekul tertentu pada suatu fluida. Ketika *adsorbent* mengalami kontak dengan fluida, maka akan tercapai keadaan setimbang setelah waktu tertentu. (Myers & Prausnitz, 1965). Dalam proses adsorpsi, *adsorbent* yang digunakan biasanya dibentuk menjadibentuk tabung atau bola. Aliran masukan mengalami kontak dengan adsorbent dalam *fixed bed*.

Agar terjadi pemisahan, sebelum aliran masukan kembali melewati kolom, aliran harus berhenti dan *adsorbent* harus diregenerasi dengan melakukan desorpsi molekul aliran masukan yang terserap. Karena kesetimbangan adsorpsi diberikan oleh kondisi operasi tertentu (komposisi, T dan P), dengan mengubah salah satu parameter proses ini dimungkinkan untuk meregenerasi *adsorbent*.

Ketika regenerasi *adsorbent* dilakukan dengan mengurangi tekanan total sistem, proses ini disebut *pressure swing adsorption* (PSA), tekanan total sistem "berayun" dari tekanan tinggi di bagian penyerapan aliran masukan dan tekanan rendah dalam regenerasi (Tondeur & Wankat, 1985). Konsep ini dipatenkan pada tahun 1932, tetapi aplikasi pertama dilakukan tiga puluh tahun kemudian (United States Patent No. U.S. patent 2, 944, 627., 1960).



Gambar 2. 1. Pressure Swing Adsorption sebagai Penangkapan Karbon Dioksida (Pirngruber & Leinekugel-le-Cocq, 2013)

Pada proses penangkapan karbon dioksida menggunakan *pressure swing adsorption* terbagi menjadi proses adsorpsi dan desorpsi. Pada proses adsorpsi terjadi peningkatan tekanan. Peningkatan tekanan ini bertujuan agar *adsorbent* mampu menyerap karbon dioksida pada aliran campuran gas. Setelah tekanan sesuai dengan tekanan optimal *adsorbent*, maka molekul yang diinginkan (dalam hal ini karbon dioksida) akan terserap pada *adsorbent*. Proses desorpsi karbon dioksida dilakukan pada tekanan rendah. Tekanan rendah dibutuhkan *adsorbent* agar mampu melepaskan karbon dioksida yang telah diserap (regenerasi *adsorbent*). Dari proses ini akan didapatkan hasil akhir gas karbon dioksida dengan kemurnian tertentu (Ko, Siriwardane, & Biegler, 2005).

2.5. Persamaan Ergun

Persamaan Ergun, dirumuskan oleh insinyur kimia Turki, Sabri Ergun pada tahun 1952. Rumus ini menunjukkan penurunan tekanan pada suatu kolom akibat perubahan bilangan Reynolds.

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\mu}{d_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + 1.75 \frac{\rho_g u^2}{d_p} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (2.5)$$

Dimana Δp = merupakan *pressure drop* (Pa)

L = panjang kolom (m)

d_p = diameter partikel (m)

u = kecepatan gas (m/s)

μ = viskositas fluida (Pa s)

ρ_g = massa jenis gas (kg/m³)

ε = porositas dari bed

Persamaan Ergun umum digunakan pada *pressure swing adsorption* untuk memperhitungkan pengaruh panjang kolom terhadap penurunan tekanan. Dengan diketahuinya penurunan tekanan ini dapat digunakan sebagai acuan untuk kebutuhan daya minimum untuk mendorong gas melewati kolom (Wilcox, 2012).

2.6. Viskositas

Viskositas adalah salah satu properti karakteristik dasar dari fluida. Ketika suatu fluida mengalir, fluida tersebut memiliki hambatan internal. Viskositas adalah ukuran dari hambatan internal antar fluida akibat adanya gesekan antar fluida tersebut.

Viskositas dinyatakan dalam dua bentuk yang berbeda, yaitu viskositas absolut atau dinamis dan viskositas kinematik. Viskositas dinamis berhubungan dengan tegangan geser dan kecepatan fluida, sedangkan viskositas kinematik selain dipengaruhi tegangan geser dan kecepatan fluida juga dipengaruhi oleh massa jenis pada tekanan dan temperatur tertentu (Viswanath, Ghosh, & Prasad, 2007).

Besarnya viskositas dinamik antara campuran dua fluida yang tidak bereaksi dapat diperkirakan dengan persamaan Herning dan Zipperer. (Davidson, 1993)

$$\eta_{mix} = \frac{\sum (\eta_i x_i \sqrt{M_i})}{\sum (x_i \sqrt{M_i})} \quad (2.6)$$

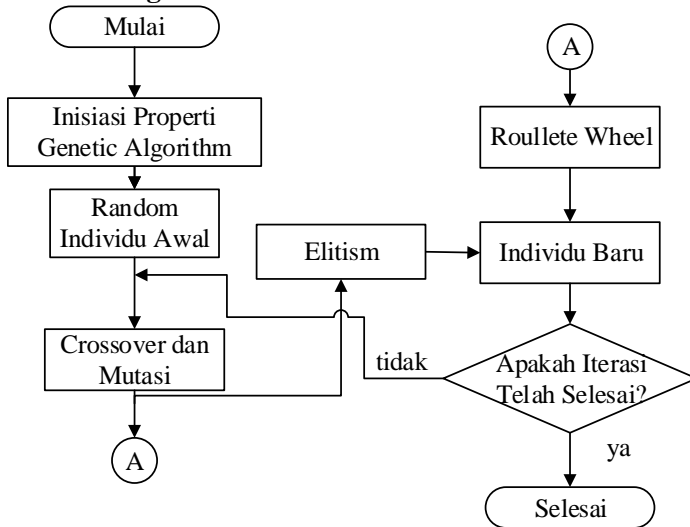
Dimana η_{mix} = viskositas campuran

η_i = viskositas komponen gas i

x_i = fraksi mol komponen gas i

M_i = massa molar komponen gas i

2.7. Genetic Algorithm



Gambar 2. 2. Flowchart Genetic Algorithm

Genetic Algorithm (GA) merupakan salah satu algoritma optimisasi stokastik. GA adalah algoritma pencarian yang mengadaptasi evolusi seleksi alam dan genetika. GA menggunakan pencarian secara acak untuk menyelesaikan masalah pada optimisasi. Pencarian secara acak oleh GA dilakukan dengan mengacu pada informasi yang sebelumnya didapatkan untuk meningkatkan performansi yang lebih baik. Prinsip dasar dari GA adalah teori dari Charles Darwin, “*Survival of The Fittest*”.

GA mensimulasikan teori dari Charles Darwin dengan menggunakan individu-individu yang telah ada pada beberapa generasi. Setiap generasi terdapat karakter dari individu yang dapat disamakan dengan DNA. GA terdiri dari beberapa tahap, yaitu tahap seleksi individu, *crossover*, dan *mutation*.

Seleksi individu merupakan tahap dimana gen setiap individu dipilih dan diambil yang terbaik untuk digunakan pada tahap *crossover*. Metode seleksi yang digunakan adalah metode *roulette*

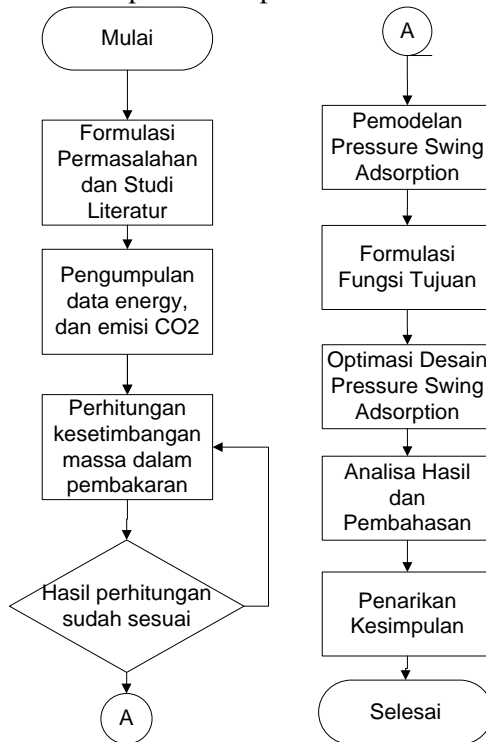
wheel. Proses pemilihan pada metode tersebut didasarkan pada evaluasi fungsi *fitness* dari setiap individu. Fungsi *fitness* adalah fungsi objektif yang digunakan untuk menentukan apakah individu tersebut sudah memiliki nilai yang mendekati nilai tujuan. Individu yang memiliki nilai *fitness* yang besar memiliki kemungkinan yang lebih tinggi untuk terpilih, tetapi tidak menutup kemungkinan pada individu dengan nilai *fitness* yang rendah untuk terpilih (Sisvanandam & Deepa, 2008). *Crossover* merupakan tahap untuk menghasilkan individu baru. *Crossover* dapat dianalogikan sebagai proses reproduksi. Dua individu yang telah diseleksi akan menjadi orang tua dari generasi individu selanjutnya. Individu baru akan memiliki kombinasi gen dari kedua orang tua. Proses ini dilakukan untuk mendapatkan individu yang lebih baik daripada orang tua. Semakin baik *fitness* yang dimiliki oleh orang tua, maka individu yang dihasilkan akan semakin baik (Sisvanandam & Deepa, 2008).

Mutation merupakan proses untuk menghindari terperangkapnya algoritma pada lokal optimum. *Mutation* memiliki peran untuk mengubah material genetik dan sebagai pengganggu informasi genetik secara acak. Hasil dari mutasi bisa saja menghasilkan *fitness* yang lebih baik maupun tidak. Proses ini terjadi dengan mengubah salah satu bit pada kromosom GA. Pada umumnya persentase terjadinya *mutation* pada kromosom sangat kecil.

Pada proses GA, dapat terjadi proses *elitism*. *Elitism* dapat dianalogikan sebagai pelindung dari kromosom pada individu yang memiliki *fitness* yang paling baik pada generasinya. Fungsi utama dari *elitism* adalah untuk memastikan kromosom yang terbaik tidak akan hilang pada optimisasi dikarenakan peristiwa mutasi. Dengan adanya *elitism*, nilai *fitness* pada GA akan meningkat secara signifikan.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian pada tugas akhir ini dirancang pada beberapa tahapan, yang digambarkan pada diagram alir seperti pada berikut. Tahapan tersebut meliputi beberapa hal berikut:



Gambar 3. 1. Diagram Alir Penelitian

3.1. Studi Literatur

Pada tahap studi literatur penulis mempelajari hal-hal yang berhubungan dengan reaksi pembakaran pada batu bara dan gas alam, serta energi yang dihasilkan pada masing masing pembakaran. Selain itu, penulis juga mempelajari teknologi *pressure swing adsorption* yang telah ada dan berpotensi untuk

diterapkan pada Pembangkit Listrik. Penulis juga mempelajari tentang biaya yang dibutuhkan dalam pengadaan modul *pressure swing adsorption*.

3.2. Pengumpulan Data Energi dan Emisi Karbon Dioksida

Laporan tugas akhir ini membutuhkan data-data untuk melakukan analisa ekonomi. Data data yang diperlukan adalah energi yang dihasilkan setiap tahun pada masing masing pembangkit listrik (PLTG Muara Tawar dan PLTU Paiton) serta emisi karbon dioksida yang dihasilkan. Berikut ini merupakan data yang didapat pada masing masing pembangkit listrik.

Tabel 3. 1. Listrik dan Emisi Karbon Dioksida yang Dihasilkan pada PLTG Muara Tawar dan PLTU Paiton

	PLTG Muara Tawar	PLTU Paiton
Listrik yang dihasilkan	5,332,666 MWh/tahun	5,149,790 MWh/tahun
Emisi karbon dioksida	3,471,290 ton/tahun	4,486,497 ton/tahun

3.3. Perhitungan Stoikiometri Pembakaran

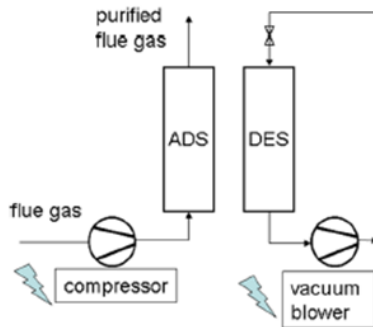
Pada tahap ini penulis melakukan perhitungan massa produk dan reaktan dalam pembakaran menggunakan stoikiometri untuk pembakaran batu bara dan pembakaran gas alam. Berikut ini merupakan data yang didapat pada masing masing pembangkit listrik.

Tabel 3. 2. Hasil Perhitungan Stoikiometri Pembakaran pada PLTG Muara Tawar dan PLTU Paiton.

Parameter	PLTG Muara Tawar	PLTU Paiton
Listrik yang dihasilkan	5,332,666 MWh/tahun	5,149,790 MWh/tahun
Bahan bakar yang dibutuhkan	1,224,205 ton gas alam/tahun	1,437,284 ton batubara/tahun
Udara yang dibutuhkan	21,007,362 ton udara/tahun	15,873,224 ton udara/tahun
Karbon dioksida yang dihasilkan	3,369,934 ton/tahun	4,486,768 ton/tahun
Nitrogen yang dihasilkan	16,110,541 ton/tahun	12,103,981 ton/tahun

3.4. Pemodelan *Pressure Swing Adsorption*

Pressure swing adsorption pada pemodelan ini terdiri dari dua kolom.dengan dua proses (adsorpsi dan desorpsi).



Gambar 3. 2. Skema *Pressure Swing Adsorption* dengan Proses Adsorpsi dan Desorpsi (Pirngruber & Leinekugel-le-Cocq, 2013)

Adsorpsi merupakan proses penyerapan karbon dioksida pada gas buang oleh *adsorbent*. Hubungan antara massa *adsorbent* yang dibutuhkan dengan penyerapan karbon dioksida dapat dituliskan

dalam persamaan berikut (Pirngruber & Leinekugel-le-Cocq, 2013)

$$m_{ads} = n_{CO_2} \cdot K_{CO_2} \quad (3.1)$$

Dimana n_{CO_2} = mol karbon dioksida yang terserap (mol)
 K_{CO_2} = kemampuan penyerapan karbon dioksida (kg/mol)

Proses adsorpsi CO_2 membutuhkan *adsorbent* tertentu. *Adsorbent* yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.3. *Adsorbent* zeolite telah digunakan secara umum dalam penyerapan CO_2 .

Tabel 3. 3. Tipe *Adsorbent* yang Digunakan

Adsorbent	Diameter (mm)	Void	Density (kg/m ³)
Zeolite 4A	2	0.3	690
Zeolite 5A	2.7	0.4	695
Zeolite 13X	1.6	0.5	660

Cross section area (S) merupakan luas penampang kolom yang mampu ditempati adsorbent. *Cross section area* dapat dituliskan dalam persamaan berikut (Pirngruber & Leinekugel-le-Cocq, 2013)

$$S_{tot} = \frac{F_{feed}}{u} (1 + \phi) \quad (3.2)$$

Dimana S_{tot} = *cross section area* keseluruhan (m²)
 F_{feed} = laju aliran feed (m³/s)
 u = kecepatan komponen gas (m/s)
 ϕ = ratio waktu desorpsi dan adsorpsi

Kemurnian penyerapan karbon dioksida yang dibuthkan dapat mempengaruhi lamanya waktu adsorpsi, kecepatan

komponen gas yang diperlukan, dan panjang kolom yang dibutuhkan. Kemurnian karbon dioksida yang dibutuhkan dapat dituliskan dalam persamaan berikut (Pirngruber & Leinekugel-le-Cocq, 2013).

$$pur = \frac{(1 - C_A)t_A}{(1 - C_A)t_A + (1 - y)\varepsilon t_C} \quad (3.3)$$

Dimana $C_A = 1 - \text{capture rate}$ komponen gas yang diadsorpsi
 y = fraksi mol zat yang diadsorpsi pada feed
 t_C = waktu kontak (s)
 t_A = waktu adsorpsi (s)
 ε = *bed void*

Waktu kontak (t_C) adalah lamanya komponen gas yang akan diadsorpsi mengalami kontak dengan adsorbent.

$$t_C = \frac{L}{u} \quad (3.4)$$

Dimana L = panjang kolom (m)
 u = kecepatan komponen gas (m/s)

Jumlah mol karbon dioksida yang diadsorpsi oleh adsorbent dalam waktu t_A dapat dituliskan sebagai berikut (Pirngruber & Leinekugel-le-Cocq, 2013).

$$n_{CO_2} = y_{CO_2} F_{feed} \frac{P_A}{RT} t_A 0.9 \quad (3.5)$$

Dimana n_{CO_2} = jumlah mol karbon dioksida yang diadsorpsi (mol)
 y_{CO_2} = fraksi mol karbon dioksida pada masukan kolom
 P_A = tekanan adsorpsi (bar)
 R = konstanta gas
 T = temperatur (K)
 t_A = waktu adsorpsi (s)

Berdasarkan penelitian Turton dkk (2008), dari panjang dan diameter kolom dapat ditentukan harga modul *pressure swing adsorption* yang digunakan (Susarla, et al., 2015).

$$BMC = 4.65 \times \frac{586}{397} \times M \times N \times PC \quad (3.6)$$

Dimana BMC = harga modul *pressure swing adsorption* (USD)

M = jumlah *pressure swing adsorption* yang digunakan

N = jumlah kolom pada satu *pressure swing adsorption*

$$\log(PC) = 3.4974 + 0.4485 \log(Vol) + 0.1074[\log(Vol)]^2$$

Untuk mengetahui besarnya *pressure drop* akibat panjang kolom dapat digunakan persamaan Ergun

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{150\mu u}{d_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + 1.75 \frac{\rho_g u^2}{d_p} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \quad (3.7)$$

Dimana Δp = *pressure drop* (Pa)

L = panjang kolom (m)

d_p = diameter partikel (m)

u = kecepatan gas (m/s)

μ = viskositas fluida (Pa s)

ρ_g = massa jenis gas (kg/m³)

ε = *bed void*

Persamaan Ergun menunjukkan bahwa *pressure drop* dipengaruhi oleh kecepatan gas dimana kecepatan gas yang dibutuhkan dipengaruhi oleh panjang kolom dan waktu adsorpsi. Semakin banyak CO₂ yang diserap maka semakin tinggi kecepatan yang dibutuhkan agar semakin banyak CO₂ yang mengalami kontak dengan adsorbent sehingga dari persamaan Ergun ini menunjukkan bahwa *pressure drop* dapat dipengaruhi oleh jumlah

CO₂ yang diserap oleh *adsorbent* dilihat dari pengaruh kecepatan terhadap jumlah CO₂ yang diserap.

Besarnya daya yang dibutuhkan untuk mendorong gas akibat adanya *pressure drop* ketika gas melewati kolom dapat dituliskan sebagai berikut (Seferlis & Papadopoulos, 2017)

$$P = \frac{p_1 Q k}{\text{eff} (k-1)} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad (3.8)$$

Dimana P = daya yang dibutuhkan untuk mendorong gas (watt)

$p_1 = p_2 + \Delta p$ (Pa)

p_2 = tekanan adsorpsi (Pa)

Q = laju aliran fluida (m³/s)

k = *specific heat ratio*

eff = efisiensi

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Ling, J, dkk (2014) untuk power yang dibutuhkan untuk menaikkan tekanan untuk proses adsorpsi maka p_1 menggunakan tekanan atmosfer, untuk proses desorpsi maka p_2 menggunakan tekanan atmosfer (Ling, et al., 2014).

Selain proses yang telah disebutkan, model *pressure swing adsorption* juga dipengaruhi oleh adsorbent yang digunakan. *Adsorbent* merupakan zat padat yang dapat menyerap komponen gas tertentu. Pada kasus ini *adsorbent* digunakan untuk penyerapan CO₂. *Adsorbent* yang digunakan dalam tugas akhir ini dibagi menjadi tiga jenis yaitu zeolite 13x, zeolite 5a, dan zeolite 4a. Ketiga adsorbent tersebut umum digunakan dalam penyerapan CO₂. Parameter pada adsorbent yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3. 4. Tipe *Adsorbent* yang Digunakan Beserta Properti Fisiknya (Wilcox, 2012)

Tipe Adsorbent	Diameter Pori (nm)	Densitas (kg/m ³)	Porositas	Diameter partikel (mm)	Harga (USD/ton)
Zeolite 4A	0.4	690	0.3	2	1500
Zeolite 5A	0.5	695	0.4	2.7	2000
Zeolite 13X	0.8	660	0.5	1.6	1800

Masing-masing adsorbent memiliki kemampuan adsorpsi CO₂ tertentu. Kemampuan adsorpsi ini dipengaruhi oleh tekanan pada saat proses adsorpsi pada *pressure swing adsorption*.

Dengan menggunakan data sekunder kemampuan adsorpsi CO₂ masing-masing *adsorbent* yang diperoleh melalui percobaan yang dilakukan oleh Md Ariful (Sarker, 2012) dapat diperoleh hubungan regresi antara tekanan (atm) dan kemampuan penyerapan CO₂ (mol/kg). Berikut persamaan regresi masing-masing *adsorbent*.

Untuk Zeolite 4a, diperoleh persamaan regresi

$$K_{CO_2} = 45.72 \cdot e^{(-0.08842p_A)} - 45.81 \cdot e^{(-0.1048p_A)} \quad (3.9)$$

Untuk Zeolite 5a, diperoleh persamaan regresi

$$K_{CO_2} = 3.018 \cdot e^{(0.01236p_A)} - 4.486 \cdot e^{(-1.839p_A)} \quad (3.10)$$

Untuk Zeolite 13X, diperoleh persamaan regresi

$$K_{CO_2} = 4.11 \cdot e^{(0.01706p_A)} - 6.112 \cdot e^{(-1.891p_A)} \quad (3.11)$$

Dimana K_{CO_2} = kapasitas penyerapan CO₂ (mol/kg)

p_A = tekanan adsorpsi (atm)

3.5. Penentuan Fungsi Tujuan

Pada tahap ini, dilakukan penentuan fungsi objektif untuk optimisasi yang digunakan pada desain *pressure swing adsorption*. Berikut ini persamaan fungsi objektif yang digunakan.

$$J_{\max} = n_{CO_2} \times \frac{31,536,000}{t_A} \times 44 \cdot 10^{-6} \times C_{CO_2} - \left[BMC + (m_{ads} \times C_{ads}) + (P_B \times 8760 \times C_{electric}) + (P_A \times 8760 \times C_{electric}) + (P_D \times 8760 \times \varphi \times C_{electric}) \right] \quad (3.12)$$

Dimana C_{CO_2} = harga jual karbon dioksida (usd/ton karbon dioksida)

C_{ads} = harga *adsorbent* (USD/kg)

$C_{electric}$ = harga listrik (USD/kwh)

P_B = daya yang dibutuhkan blower

P_A = daya kompresor saat adsorpsi

P_D = daya pompa saat desorpsi

Harga modul *pressure swing adsorption* pada fungsi tujuan ini menggunakan persamaan 3.6 yang mengacu pada penelitian Susarla, N dkk.

3.6. Optimisasi Desain menggunakan *Genetic Algorithm*

Teknik optimisasi pada tugas akhir ini dirancang supaya dapat menghasilkan nilai optimum yang terbaik. Pada optimisasi ini, fungsi objektif yang digunakan adalah keuntungan yang maksimum berdasarkan penjualan karbon dioksida dengan harga berdasarkan pada *Carbon Dioxide Price Report* (Luckow, et al., 2015) dan kebutuhan dalam pengadaan modul *pressure swing adsorption* dan biaya operasional. Keluaran dari *genetic algorithm* sendiri nantinya adalah berupa keuntungan dalam U.S Dollar (USD). Untuk memperoleh suatu biaya yang minimal maka dipengaruhi oleh besar komposisi yang digunakan dan laju aliran.

Jumlah variable yang dioptimasi pada tugas akhir ini adalah 4, antara lain waktu adsorpsi, panjang kolom, tekanan adsorpsi, dan diameter kolom. Probabilitas *crossover* sebesar 0.8 dan probabilitas terjadinya mutasi adalah 0.01 dengan iterasi 500 kali dan populasi 100. Penentuan nilai probabilitas *crossover*, probabilitas mutasi, iterasi, dan populasi berdasarkan percobaan

yang dilakukan yang menghasilkan nilai terbaik setelah dilakukan *running program*.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Properti Gas Buang

Pada analisa properti gas buang dilakukan perhitungan stoikiometri pembakaran di PLTG Muara Tawar dan PLTU Paiton. Dari perhitungan stoikiometri dan perhitungan dengan menggunakan faktor emisi didapatkan nilai seperti pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1. Perhitungan Massa CO₂ Menggunakan Faktor Emisi dan Stoikiometri

	Perhitungan Massa CO ₂ Menggunakan Faktor Emisi	Perhitungan Massa CO ₂ Menggunakan Stoikiometri
Paiton	4,486,497,048 kg	4,486,768,697 kg
Muara Tawar	3,471,290,292 kg	3,369,934,364 kg

Faktor emisi yang digunakan menyesuaikan besarnya faktor emisi untuk gas alam dan batu-bara di Indonesia. Dengan faktor emisi untuk gas alam sebesar 54,300 ton CO₂/TJ dan faktor emisi untuk batu bara sebesar 96,800 ton CO₂/TJ.

Tabel 4. 2. Hasil Perhitungan Stoikiometri untuk Massa CO₂ dan Massa N₂ pada Gas Buang

	Massa CO ₂	Massa N ₂
Paiton	4,486,768,697 kg	12,103,981,519 kg
Muara Tawar	3,369,934,364 kg	16,110,541,053 kg

Hasil yang didapat dari perhitungan stoikiometri digunakan sebagai data komposisi nitrogen dan karbon dioksida pada gas buang. Properti gas pada *pressure swing adsorption* yang digunakan dalam pemodelan dapat dilihat pada Tabel 4.3

Tabel 4. 3. Properti Gas pada *Pressure Swing Adsorption*

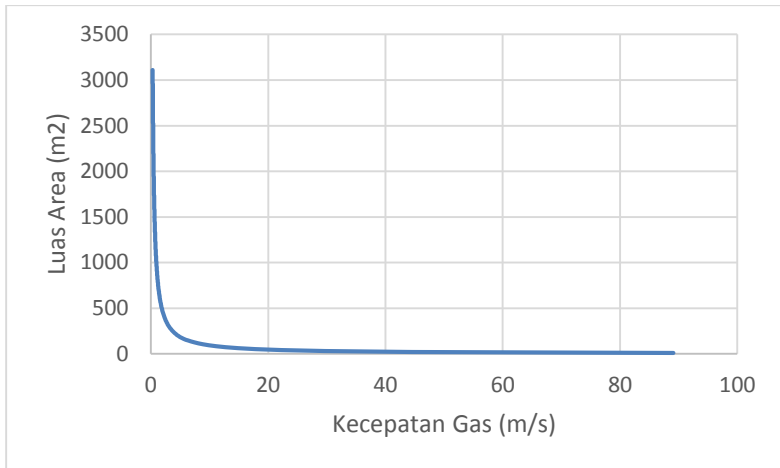
Parameter	PLTG Muara Tawar	PLTU Paiton
Laju massa pada masukan <i>pressure swing adsorption</i>	637 kg/s	526 kg/s
Fraksi mol CO ₂	0.12	0.19
Kemurnian CO ₂ yang Diinginkan	99%	99%

Pada Tabel 4.1 menunjukkan properti gas yang digunakan pada pemodelan *pressure swing adsorption*. Gas buang yang digunakan sebagai masukan pada *pressure swing adsorption* tersusun atas campuran gas CO₂ dan gas N₂.

4.2. Hasil Pemodelan *Pressure Swing Adsorption*

Pemodelan *pressure swing adsorption* bertujuan untuk mengetahui hubungan antara variabel perhitungan yang digunakan. Dari persamaan 3.2 dapat diketahui hubungan antara luas penampang kolom adsorpsi yang digunakan dengan kecepatan gas yang melewati kolom. Hubungan antara luas penampang kolom adsorpsi dengan kecepatan gas yang melewati kolom dapat dilihat pada Gambar 4.1.

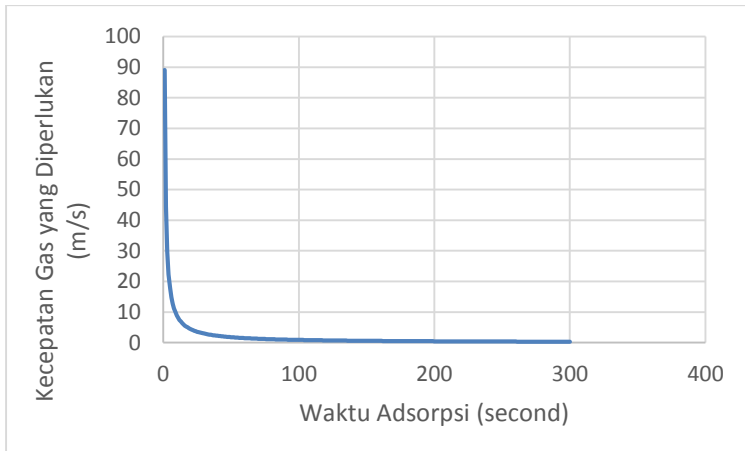
Semakin besar luas penampang kolom akan mengakibatkan semakin besar biaya yang dibutuhkan dalam pembelian dan pembuatan kolom *pressure swing adsorption* sesuai dengan persamaan 3.6. Hubungan antara harga pembuatan kolom *pressure swing adsorption* dengan luas penampang yang digunakan dapat dilihat pada subbab perhitungan biaya.



Gambar 4. 1. Grafik Hubungan Antara Kecepatan Gas dengan Luas Penampang pada Kolom dengan Panjang 2 Meter

Pada Gambar 4.1. menunjukkan semakin besar luas penampang kolom maka semakin kecil kecepatan gas yang melewati kolom dan sebaliknya.

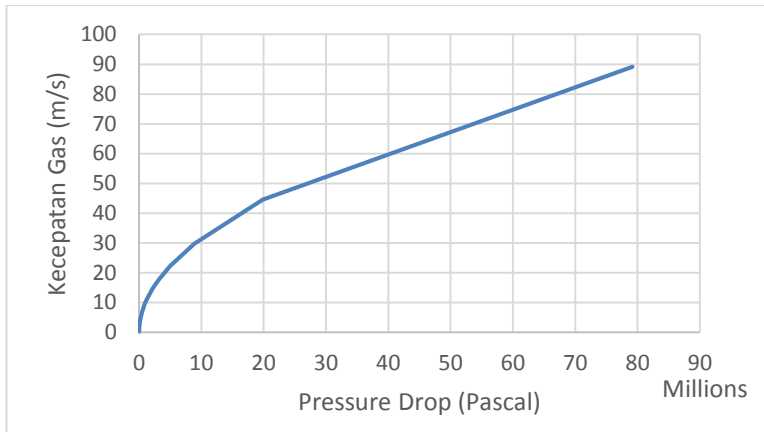
Selain dipengaruhi oleh luas penampang, kecepatan gas dipengaruhi oleh waktu adsorpsi. Hubungan antara waktu adsorpsi dengan kecepatan gas pada kolom adsorpsi dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2. Grafik Hubungan Antara Waktu Adsorpsi dengan Kecepatan Gas pada Panjang Kolom Konstan (2 meter)

Berdasarkan Gambar 4.2 yang didapat dari perhitungan menggunakan persamaan 3.3 dan persamaan 3.4 maka didapatkan hubungan antara kecepatan dalam kolom adsorpsi dengan waktu adsorpsi. Kecepatan dalam kolom adsorpsi akan menurun seiring dengan kenaikan waktu adsorpsi. Hal ini dikarenakan semakin lama waktu adsorpsi maka semakin lama waktu kontak karbondioksida dengan adsorbent sehingga kecepatan gas yang dibutuhkan akan semakin menurun.

Semakin besar kecepatan gas maka semakin besar *pressure drop* yang terjadi. Hal ini sesuai dengan persamaan Ergun dimana kecepatan dan besarnya *pressure drop* berbanding lurus. Semakin besar *pressure drop* maka daya yang dibutuhkan akan semakin besar sehingga mengakibatkan semakin besar biaya listrik yang dibutuhkan. Hubungan antara kecepatan gas pada kolom dengan *pressure drop* yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 3. Grafik Hubungan Antara *Pressure Drop* dengan Kecepatan Gas pada Kolom Adsorpsi Studi Kasus PLTU Paiton

4.3. Pemodelan *Adsorbent*

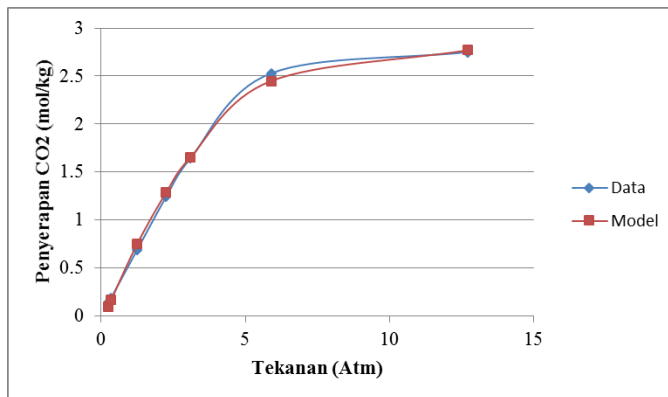
Berikut ini merupakan data percobaan kemampuan penyerapan CO₂ oleh zeolite pada tekanan tertentu yang dilakukan oleh Md Ariful (Sarker, 2012)

Tabel 4. 4. Data Kemampuan Penyerapan CO₂ pada Tekanan yang Bervariasi (Sarker, 2012)

Zeolite 4A		Zeolite 5A		Zeolite 13X	
Tekanan (Atm)	Total CO ₂ yang diserap (mol/kg adsorbent)	Tekanan (Atm)	Total CO ₂ yang diserap (mol/ kg adsorbent)	Tekanan (Atm)	Total CO ₂ yang diserap (mol/ kg adsorbent)
0.25	0.14	0.48	1.17	0.36	0.92
0.35	0.19	0.93	2.28	0.48	1.81
1.25	0.69	1.77	2.85	0.74	2.74
2.25	1.24	3.72	3.16	1.23	3.51
3.09	1.64	6.55	3.33	1.9	3.91
5.89	2.53	11.2	3.44	3.32	4.38
12.69	2.75			6.3	4.76
				12.86	5.05

Pada tabel dapat dilihat bahwa semakin tinggi tekanan adsorpsi maka semakin tinggi kemampuan penyerapan CO_2 dan semakin rendah tekanan maka semakin rendah kemampuan penyerapan CO_2 . Hal ini sesuai dengan kegunaan *adsorbent* pada kolom adsorpsi dan desorpsi *pressure swing adsorption*. Proses adsorpsi pada *pressure swing adsorption* menggunakan tekanan tinggi sehingga semakin banyak jumlah CO_2 yang dapat diserap. Proses pada kolom desorpsi menggunakan tekanan rendah yang mengakibatkan kemampuan penyerapan CO_2 oleh adsorbent semakin rendah, sehingga pada proses *pressure swing adsorption* dimana tekanan berubah dari tekanan tinggi ke tekanan rendah maka CO_2 yang telah diserap pada saat tekanan tinggi akan dilepaskan pada saat tekanan rendah karena kemampuan penyerapan yang berubah.

Gambar 4.4 menunjukkan grafik hubungan antara tekanan gas yang melewati *adsorbent* dengan kemampuan penyerapan CO_2 pada *adsorbent* zeolite 4a. Dapat dilihat pada grafik yang didapat, semakin tinggi tekanan gas yang melewati *adsorbent* maka semakin tinggi kemampuan penyerapan CO_2 pada *adsorbent*.



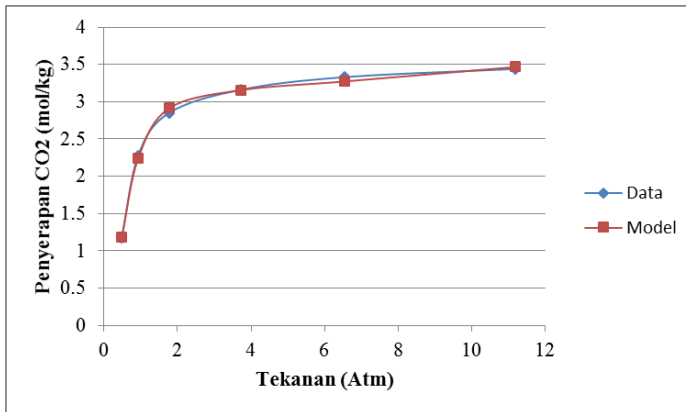
Gambar 4. 4. Grafik Hubungan Antara Tekanan Gas yang Melewati *Adsorbent* dengan Kemampuan Penyerapan CO_2 pada Zeolite 4a

Dari grafik pada Gambar 4.4 dapat diperoleh persamaan regresi yang menunjukkan hubungan antara tekanan gas yang melewati adsorbent dengan kemampuan penyerapan CO₂ pada zeolite 4a seperti yang tertulis pada persamaan 3.9. Dari persamaan 3.9, diperoleh nilai penyerapan CO₂ seperti pada Tabel 4.5.

Tabel 4. 5. Nilai Penyerapan CO₂ Menggunakan Persamaan Regresi pada Zeolite 4a

Zeolite 4a		
Tekanan (Atm)	Total CO ₂ yang diserap (mol/kg adsorbent)	Nilai Penyerapan CO ₂ dari Persamaan Regresi (mol/kg adsorbent)
0.25	0.14	0.095083
0.35	0.19	0.16664
1.25	0.69	0.750693
2.25	1.24	1.284793
3.09	1.64	1.651924
5.89	2.53	2.449358
12.69	2.75	2.770196

Pada Gambar 4.5 menunjukkan grafik hubungan antara tekanan gas yang melewati *adsorbent* dengan kemampuan penyerapan CO₂ pada *adsorbent* zeolite 5a. Seperti pada zeolite 4a, semakin tinggi tekanan gas saat melewati *adsorbent* maka semakin tinggi kemampuan penyerapan CO₂. Kemampuan penyerapan CO₂ cenderung linier pada tekanan yang lebih tinggi.



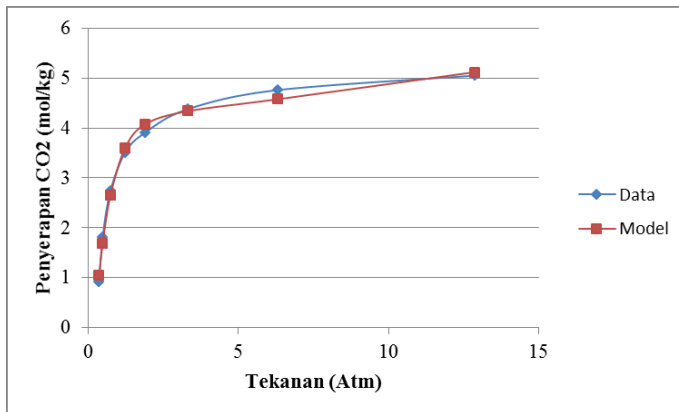
Gambar 4. 5. Grafik Hubungan Antara Tekanan Gas yang Melewati *Adsorbent* dengan Kemampuan Penyerapan CO₂ pada Zeolite 5a

Dari grafik pada Gambar 4.5 dapat diperoleh persamaan regresi yang menunjukkan hubungan antara tekanan gas yang melewati adsorbent dengan kemampuan penyerapan CO₂ pada zeolite 5a seperti yang tertulis pada persamaan 3.10. Perhitungan menggunakan persamaan 3.10 diperoleh nilai seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6. Nilai Penyerapan CO₂ Menggunakan Persamaan Regresi pada Zeolite 5a

Zeolite 5a		
Tekanan (Atm)	Total CO ₂ yang diserap (mol/kg adsorbent)	Nilai Penyerapan CO ₂ dari Persamaan Regresi (mol/kg adsorbent)
0.48	1.17	1.180297
0.93	2.28	2.241747
1.77	2.85	2.911685
3.72	3.16	3.15521
6.55	3.33	3.272468
11.2	3.44	3.466087

Gambar 4.7 menunjukkan grafik hubungan antara tekanan gas yang melewati *adsorbent* dengan kemampuan penyerapan CO_2 pada *adsorbent* zeolite 13x. Pada umumnya, semakin tinggi tekanan gas saat melewati *adsorbent* maka semakin tinggi kemampuan penyerapan CO_2 . Kemampuan penyerapan CO_2 cenderung linier (tidak mengalami kenaikan yang signifikan) pada tekanan yang lebih tinggi.



Gambar 4. 6. Grafik Hubungan Antara Tekanan Gas yang Melewati *Adsorbent* dengan Kemampuan Penyerapan CO_2 pada Zeolite 13x

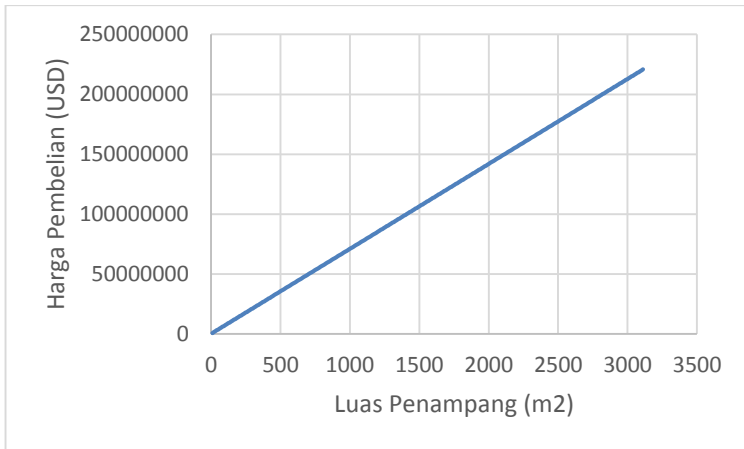
Dari grafik pada Gambar 4.6 dapat diperoleh persamaan regresi yang menunjukkan hubungan antara tekanan gas yang melewati *adsorbent* dengan kemampuan penyerapan CO_2 pada zeolite 13x seperti yang tertulis pada persamaan 3.11. Perhitungan menggunakan persamaan 3.11 diperoleh data perhitungan kemampuan penyerapan CO_2 seperti ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7. Nilai Penyerapan CO₂ Menggunakan Persamaan Regresi pada Zeolite 13x

Zeolite 13x		
Tekanan (Atm)	Total CO ₂ yang diserap (mol/kg adsorbent)	Nilai Penyerapan CO ₂ dari Persamaan Regresi (mol/kg adsorbent)
0.36	0.92	1.041229
0.48	1.81	1.677852
0.74	2.74	2.654019
1.23	3.51	3.600058
1.9	3.91	4.077212
3.32	4.38	4.338034
6.3	4.76	4.576306
12.86	5.05	5.11826

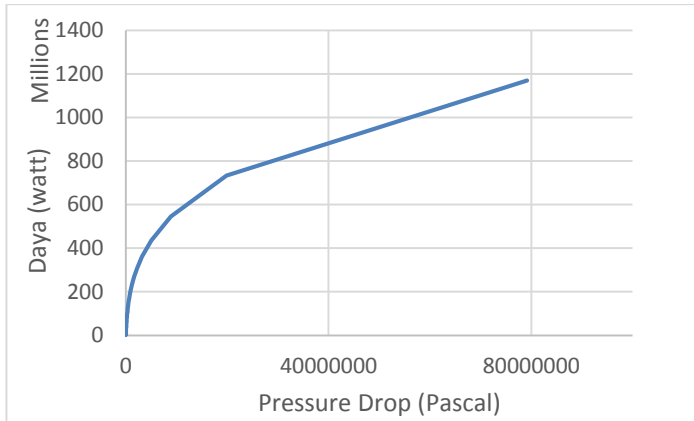
4.4. Perhitungan Biaya

Perhitungan biaya yang dibutuhkan dibagi menjadi dua yaitu CAPEX dan OPEX. CAPEX atau *capital expenditures* merupakan modal awal yang dibutuhkan untuk pengadaan teknologi. Pada kasus ini, CAPEX terdiri dari pembelian kolom *pressure swing adsorption* dan pembelian *adsorbent* yang digunakan. Pembelian kolom *pressure swing adsorption* sesuai dengan persamaan 3.6. Pada persamaan 3.6, variable yang berpengaruh pada harga kolom *pressure swing adsorption* antara lain volume dan jumlah *pressure swing adsorption* yang digunakan. Dengan ketinggian kolom tertentu maka dapat dicari hubungan antara luas penampang *pressure swing adsorption* dengan biaya dalam pengadaan teknologi. Grafik hubungan antara luas penampang *pressure swing adsorption* dengan biaya dalam pengadaan teknologi dapat dilihat pada Gambar 4.7. Semakin besar luas penampang *pressure swing adsorption* maka semakin tinggi biaya pengadaan alat.



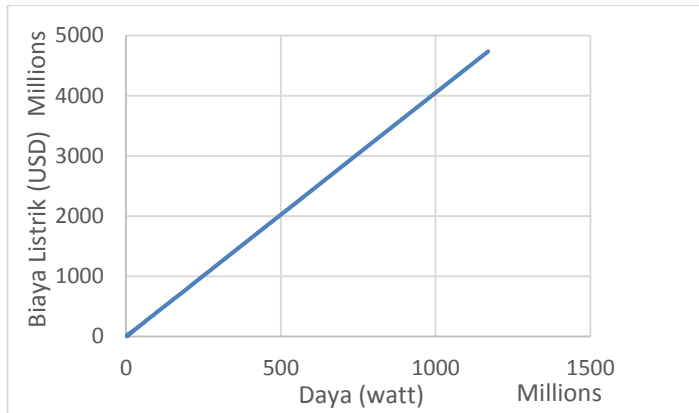
Gambar 4. 7. Hubungan Antara Luas Penampang dengan Harga Pembelian *Pressure Swing Adsorption*

OPEX atau *operational expenditure* merupakan biaya operasional dari teknologi yang digunakan. Pada kasus ini, OPEX terdiri dari biaya listrik yang dibutuhkan pada *blower*, *compressor*, dan *vacuum pump* dimana besar daya yang dibutuhkan dipengaruhi oleh *pressure drop*. Hubungan antara daya yang dibutuhkan dengan *pressure drop* yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.8. Semakin tinggi *pressure drop* yang terjadi maka semakin tinggi daya yang dibutuhkan untuk mendorong gas.



Gambar 4. 8. Hubungan Antara Daya yang Dibutuhkan untuk Mendorong Gas dengan *Pressure Drop* yang Terjadi

Biaya yang dibutuhkan pada operasional dipengaruhi oleh daya yang dibutuhkan, waktu penggunaan, dan harga listrik per kwh. Persamaan dalam perhitungan biaya operasional dapat dilihat pada persamaan 3.12. Hubungan antara daya yang dibutuhkan oleh dengan biaya operasional dapat dilihat pada Gambar 4.9. Semakin tinggi daya yang dibutuhkan oleh *compressor*, *blower*, dan *vacuum pump* maka semakin tinggi biaya listrik yang harus dicukupi sedangkan semakin rendah daya yang dibutuhkan maka semakin rendah biaya listrik yang harus dicukupi.



Gambar 4. 9. Hubungan Antara Daya yang Dibutuhkan dengan Biaya Operasional

4.5. Optimisasi *Plant*

Setelah dilakukan pemodelan, selanjutnya dilakukan optimisasi desain *pressure swing adsorption*. Variabel yang dioptimisasi adalah waktu adsorpsi, panjang kolom, tekanan adsorpsi, dan diameter kolom. Waktu adsorpsi dipilih sebagai variabel yang di optimisasi dikarenakan waktu adsorpsi mempengaruhi kecepatan dan *pressure drop* seperti dijelaskan pada subbab 4.2. *Pressure drop* akan mempengaruhi besarnya pengeluaran yang dibutuhkan untuk kebutuhan daya listrik seperti yang dijelaskan pada subbab 4.4. Panjang kolom dan luas penampang kolom dipilih sebagai variabel optimisasi dikarenakan memiliki pengaruh terhadap biaya pembuatan kolom. Tekanan adsorpsi dipilih sebagai variabel optimisasi dikarenakan mempengaruhi kemampuan serap adsorbent seperti dijelaskan pada subbab 4.3. Kemampuan serap adsorbent akan mempengaruhi berapa CO₂ yang mampu diserap dan dihasilkan oleh *pressure swing adsorption* sehingga mempengaruhi jumlah CO₂ yang dapat dijual. Selain itu, tekanan adsorpsi juga mempengaruhi daya yang dibutuhkan *compressor* sehingga dapat mempengaruhi besarnya biaya operasional yang dibutuhkan.

Metode yang digunakan dalam optimisasi pada tugas akhir ini antara lain *Genetic Algorithm* (GA), *Duelist Algorithm* (DA),

Particle Swarm Optimization (PSO), *Rainwater Algorithm* (RW), dan *Killer Whale Algorithm* (KW). Pada kasus ini, optimisasi dilakukan sebanyak 5 kali (masing-masing 500 iterasi) untuk menentukan nilai variabel optimisasi yang menghasilkan keuntungan maksimum. Dari hasil optimisasi menggunakan 5 metode didapat nilai terbaik pada metode Genetic Algorithm dikarenakan fungsi objektif yang digunakan bertujuan untuk menghasilkan nilai maksimum (sesuai dengan fungsi Genetic Algorithm) dan setting parameter yang dilakukan pada Genetic Algorithm telah sesuai. Hasil optimisasi pada kelima metode dapat dilihat pada Tabel a.2 pada lampiran. Optimisasi dilakukan dengan fungsi objektif yang telah dijelaskan pada Bab III. Fungsi objektif ini menunjukkan keuntungan yang didapat pada penjualan CO₂ dan dikurangi dengan *capital expenditures* yang terdiri dari pembelian kolom *pressure swing adsorption* dan *operational expenditures* yang terdiri dari biaya listrik yang dibutuhkan untuk kerja *blower*, *compressor*, dan *vacuum pump*. Dari fungsi tersebut didapat tabel nilai *profit* yang menunjukkan keuntungan maksimum selama 6 tahun produksi dan variabel optimisasi yang mengakibatkan nilai *profit* tersebut yang dapat dilihat pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Hasil Optimisasi pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar dan PLTU Paiton dengan Menggunakan 3 *Adsorbent*

Studi Kasus	Profit	t_A (s)	l (m)	p_A (atm)	d (m)
PLTG Muara Tawar menggunakan zeolite 4a	90,141,938 USD	93	2	1	4
PLTG Muara Tawar menggunakan zeolite 5a	187,040,409 USD	89	2	1.52	4
PLTG Muara Tawar menggunakan zeolite 13x	243,071,316 USD	90	2	1.1	4
PLTU Paiton menggunakan zeolite 4a	208,169,252 USD	85	2	0.95	4
PLTU Paiton menggunakan zeolite 5a	279,085,735 USD	82	2	1.43	4
PLTU Paiton menggunakan zeolite 13x	356,627,026 USD	83	2	1	4

Dari tabel 4.6 dapat diketahui bahwa nilai tekanan adsorpsi dipengaruhi oleh jenis *adsorbent* yang digunakan. Masing-masing *adsorbent* memiliki kondisi tekanan optimal dalam penyerapan CO₂. Didapat bahwa zeolite 4a memerlukan tekanan 0.95 atm pada PLTU Paiton dan 1 atm pada PLTG Muara Tawar, zeolite 5a memerlukan tekanan 1.43 atm pada PLTU Paiton dan 1.52 atm pada PLTG Muara Tawar, dan zeolite 13x memerlukan tekanan 1 atm untuk PLTU Paiton dan 1.1 atm untuk PLTG Muara tawar.

Tinggi kolom *pressure swing adsorption* menunjukkan nilai batas bawah pada optimisasi. Hal ini menunjukkan semakin rendah kolom *pressure swing adsorption* maka semakin menguntungkan pada produksi CO₂. Hal ini dikarenakan semakin rendah kolom *pressure swing adsorption* maka semakin kecil *pressure drop* yang terjadi dan semakin kecil biaya yang dibutuhkan dalam pengadaan kolom *pressure swing adsorption*.

Diameter kolom menunjukkan nilai batas atas pada optimisasi. Hal ini menunjukkan luas penampang yang besar pada kolom adsorpsi (mengakibatkan jumlah kolom yang digunakan semakin sedikit) akan lebih menguntungkan pada produksi CO₂ dibanding kolom dengan diameter kecil dan jumlah yang banyak.

Waktu adsorpsi dipengaruhi oleh kondisi laju aliran dan fraksi CO₂ pada studi kasus yang digunakan disamping dipengaruhi oleh *adsorbent* yang digunakan. Pada hasil optimisasi didapatkan nilai waktu adsorpsi pada rentang 82 hingga 93 detik. Hal ini sesuai dengan review jurnal oleh Grande A.C (Grande, 2012) bahwa pada *pressure swing adsorption* waktu satu siklus *pressure swing adsorption* umumnya tidak melebihi 10 menit atau 600 detik.

Dari hasil optimisasi diperoleh keuntungan maksimal pada kedua studi kasus pada penggunaan adsorbent zeolite 13x. Hal ini sesuai dengan pemilihan penggunaan *adsorbent* zeolite 13x dibanding *adsorbent* zeolite lain pada penelitian *pressure swing adsorption* pada umumnya. Dari hasil optimisasi pada tugas akhir ini dapat dijelaskan bahwa penggunaan *adsorbent* zeolite 13x pada penelitian lain dikarenakan *adsorbent* ini yang paling menguntungkan dari segi ekonomi disamping efektifitas *adsorbent* zeolite 13x dalam penyerapan CO₂ yang lebih tinggi dibanding

adsorbent lain. Pada tekanan yang sama *adsorbent* zeolite 13x mampu menyerap CO₂ lebih tinggi dibanding zeolite 4a dan zeolite 5a. Dengan menggunakan zeolite 13x pada studi kasus PLTU Paiton didapatkan keuntungan sebesar 356,627,026 USD selama 6 tahun sedangkan pada studi kasus PLTG Muara Tawar didapatkan keuntungan sebesar 243,071,316 USD selama 6 tahun.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Telah didapat desain *pressure swing adsorption* yang optimal terhadap penyerapan karbon dioksida dari segi ekonomi. Keuntungan terbesar didapat dengan menggunakan zeolite 13x pada kedua studi kasus. Pada desain *pressure swing adsorption* untuk studi kasus PLTG Muara Tawar didapat keuntungan sebesar 243,071,316 USD ketika menggunakan zeolite 13x dengan waktu adsorpsi 90 detik, tekanan adsorpsi 1.1 atm dan panjang serta diameter kolom berturut-turut adalah 2 dan 4 meter. Sedangkan pada desain *pressure swing adsorption* untuk studi kasus PLTU Paiton diperoleh keuntungan sebesar 356,627,026 USD pada penggunaan zeolite 13x dengan waktu adsorpsi 83 detik, tekanan adsorpsi 1 atm, dan panjang serta diameter kolom berturut-turut adalah 2 dan 4 meter.
- Telah diketahui pengaruh kondisi operasional *pressure swing adsorption* terhadap keuntungan yang didapatkan berdasarkan penjualan karbon dioksida. Semakin panjang kolom yang digunakan maka biaya pengadaan modul *pressure swing adsorption* akan semakin tinggi. Semakin kecil luasan kolom kecepatan yang dibutuhkan gas untuk melewati kolom akan semakin tinggi sehingga dapat mempengaruhi *pressure drop*. Waktu adsorpsi dapat mempengaruhi kecepatan sehingga dapat mempengaruhi *pressure drop*. Semakin lama waktu adsorpsi maka semakin rendah kecepatan yang dibutuhkan sehingga semakin rendah juga *pressure drop*. Semakin rendah *pressure drop* maka semakin rendah daya listrik yang dibutuhkan sehingga semakin rendah biaya listrik yang dibutuhkan. Tekanan adsorpsi akan mempengaruhi kemampuan penyerapan oleh *adsorbent* disamping mempengaruhi daya listrik yang dibutuhkan. Semakin tinggi

tekanan adsorpsi maka semakin tinggi kemampuan penyerapan *adsorbent* namun daya yang dibutuhkan akan semakin tinggi ketika tekanan adsorpsi semakin tinggi.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian-penelitian berikutnya yang memiliki topik sejenis atau tidak jauh dari penelitian yang dilakukan penulis pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- Dapat dilakukan analisa teknologi lain sehingga dapat dibandingkan dengan teknologi yang telah diteliti.
- Dapat menggunakan adsorbent lain sehingga dapat dibandingkan dengan penelitian yang telah dilakukan.
- Dapat dilakukan pengembangan tugas akhir ini dengan menganalisa faktor *capital expenditures* dan *operational expenditures* lain secara lebih rinci.

DAFTAR PUSTAKA

- Corradetti, A., & Desideri, U. (2005). Analysis of Gas-Steam Combined Cycles With Natural Gas Reforming and CO₂ Capture. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 545-552.
- Davidson, T. A. (1993). *A Simple and Accurate Method for Calculating Viscosity of Gaseous Mixtures*. Washington: Bureau of Mines.
- Glassman, I., & Yetter, R. A. (2008). *Combustion*. Oxford: Elsevier.
- Grande, C. A. (2012). Advances in Pressure Swing Adsorption for Gas Separation. *International Scholarly Research Network*, 2012. doi:10.5402/2012/982934
- Ko, D., Siriwardane, R., & Biegler, L. T. (2005). Optimization of Pressure Swing Adsorption and Fractionated Vacuum Pressure Swing Adsorption Processes for CO₂ Capture. *Industrial Engineering Chemistry*, 2005(44), 8084-8094.
- Leung, D., Caramana, G., & Maroto-Valer, M. M. (2014). An Overview of Current Status of Carbon Dioxide Capture and Storage Technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426-443.
- Ling, J., Ntiamoah, A., Xiao, P., Xu, D., Webley, P. A., & Zhai, Y. (2014). Overview of CO₂ Capture from Flue Gas Streams by Vacuum Pressure Swing Adsorption Technology. *Austin Chemical Engineering*.
- Luckow, P., Stanton, E. A., Fields, S., Biewald, B., Jackson, S., Fisher, J., & Wilson, R. (2015). *2015 Carbon Dioxide Price Forecast*. Cambridge: Synapse.
- Myers, A. L., & Prausnitz, J. M. (1965). Thermodynamics of Mixed-Gas Adsorption. *AIChE Journal*, 121-127.
- Narayanan, K. V., & Lakshmikutty, B. (2006). *Stoichiometry and Process Calculation*. New Delhi: Prentice Hall Of India.
- Pirngruber, G. D., & Leinekugel-le-Cocq, D. (2013). Design of a Pressure Swing Adsorption Process for Postcombustion

- CO₂ Capture. *Industrial Engineering and Chemistry Research*(52), 5985-5996.
- Sarker, A. I. (2012). *Equilibrium and Mass Transfer Behaviour of CO₂ Adsorption*. Regina, Saskatchewan: University of Regina.
- Seferlis, P., & Papadopoulos, A. I. (2017). *Process System and Materials for CO₂ Capture*. Greece: John Wiley & Sons.
- Sheng, J. J. (2011). *Modern Chemical Enhanced Oil Recovery*. Oxford: Elsevier.
- Sisvanandam, S., & Deepa, S. (2008). *Introduction to Genetic Algorithm*. New York: Springer.
- Skarstorm, C. W. (1960). *United States Patent No. U.S. patent 2,944,627*,.
- Susarla, N., Haghpanah, R., Karimi, I., Farooq, S., Rajendran, A., Tan, L. S., & Lim, J. S. (2015). Energy and cost estimates for capturing CO₂ from adry flue gas using pressure/vacuum swing adsorption. *Chemical Engineering Research and Design*(102), 354-367.
- Tondeur, D., & Wankat, P. C. (1985). Gas Purification by Pressure Swing Adsorption. *Separation and Purification Methods*, 157-212.
- Viswanath, D. S., Ghosh, T. K., & Prasad, D. H. (2007). *Viscosity of Liquid*. Dordrecht: Springer.
- Wilcox, J. (2012). *Carbon Capture*. New York: Springer Science.
- Zhang, N., & Lior, N. (2008). Two Novel Oxy-Fuel Power Cycles Integrated With Natural Gas Reforming and CO₂ Capture. *Energy*, 340-351.

LAMPIRAN A

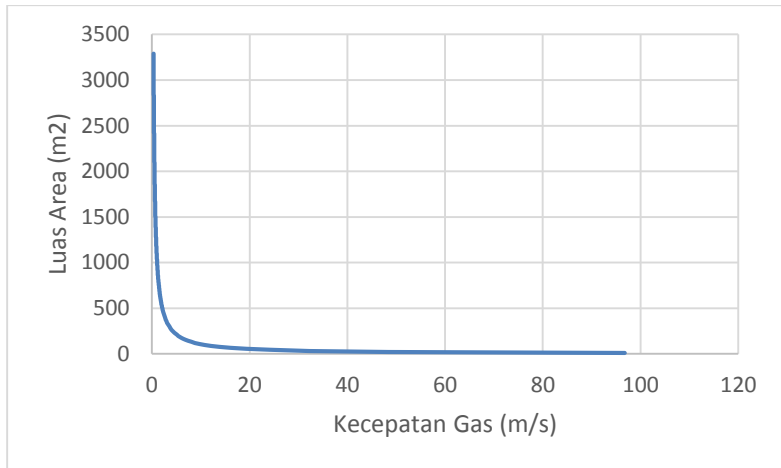
Tabel a.1. menunjukkan data variabel optimisasi yang dilakukan dengan menggunakan lima metode. Didapat hasil terbaik (dilihat dari profit terbesar) pada penggunaan *Genetic Algorithm*, *Particle Swarm Optimization* dan *Killer Whale Algorithm*.

Tabel a. 1. Optimisasi Menggunakan Metode GA, DA, PSO, RW, dan KW

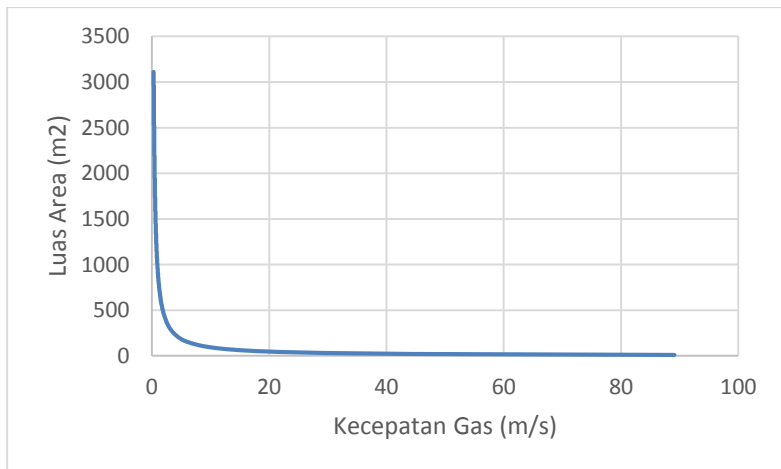
		GA	DA	PSO	RW	KW
Zeolite 13x Muara Tawar	<i>Profit</i> (x10 ⁶ USD)	243.1	193.1	243.1	217.9	243.1
	<i>adsorption</i> <i>time</i> (s)	90	66	90	109	90
	<i>length</i> (m)	2.00	2.05	2.00	2.01	2.00
	<i>pressure</i> (atm)	1.10	0.74	1.10	1.10	1.10
	<i>diameter</i> (m)	4.00	3.22	4.00	2.72	4.00
Zeolite 13x Paiton	<i>Profit</i> (x10 ⁶ USD)	356.6	337.1	356.6	327.4	356,6
	<i>adsorption</i> <i>time</i> (s)	83	88	83	61	83
	<i>length</i> (m)	2.00	2.35	2.00	2	2.00
	<i>pressure</i> (atm)	1.00	1.06	1.00	1	1.00
	<i>diameter</i> (m)	4.00	3.47	4.00	2	4.00
Zeolite 5a Muara Tawar	<i>Profit</i> (x10 ⁶ USD)	187	172.8	187	181	187
	<i>adsorption</i> <i>time</i> (s)	89	90	89	103	89
	<i>length</i> (m)	2.00	2.25	2.00	2.00	2.00

Zeolite 5a Muara Tawar	<i>pressure</i> (atm)	1.52	1.58	1.55	1.75	1.55
	<i>diameter</i> (m)	4.00	3.60	4.00	3.88	4.00
Zeolite 5a Paiton	<i>Profit</i> (x10 ⁶ USD)	279.1	248.4	279.1	259.2	279.1
	<i>adsorption</i> <i>time</i> (s)	82	120	82	72	82
	<i>length</i> (m)	2.00	2.50	2.00	2.00	2.00
	<i>pressure</i> (atm)	1.43	1.34	1.43	1.42	1.43
	<i>diameter</i> (m)	4.00	3.14	4.00	2.32	4.00
Zeolite 4a Muara Tawar	<i>Profit</i> (x10 ⁶ USD)	90.1	38.0	90.1	83.4	90.1
	<i>adsorption</i> <i>time</i> (s)	93	72	93	91	93
	<i>length</i> (m)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
	<i>pressure</i> (atm)	1.00	1.42	1.00	1.01	1.00
	<i>diameter</i> (m)	4.00	2.32	4.00	3.76	4.00
Zeolite 4a Paiton	<i>Profit</i> (x10 ⁶ USD)	208.2	98.0	208.2	159,8	208.2
	<i>adsorption</i> <i>time</i> (s)	85	61	85	72	85
	<i>length</i> (m)	2.00	2.10	2.00	2	2.00
	<i>pressure</i> (atm)	0.95	0.78	0.95	0.83	0.95
	<i>diameter</i> (m)	4.00	1.69	4.00	2.44	4.00

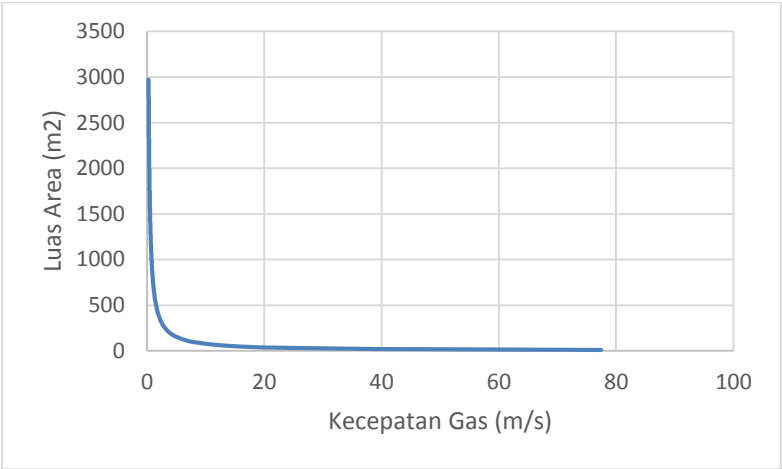
Gambar a.1 hingga a.36 menunjukkan grafik dari data desain *Pressure Swing Adsorption* pada studi kasus PLTG Muara Tawar dan PLTU Paiton dengan menggunakan 3 adsorbent.



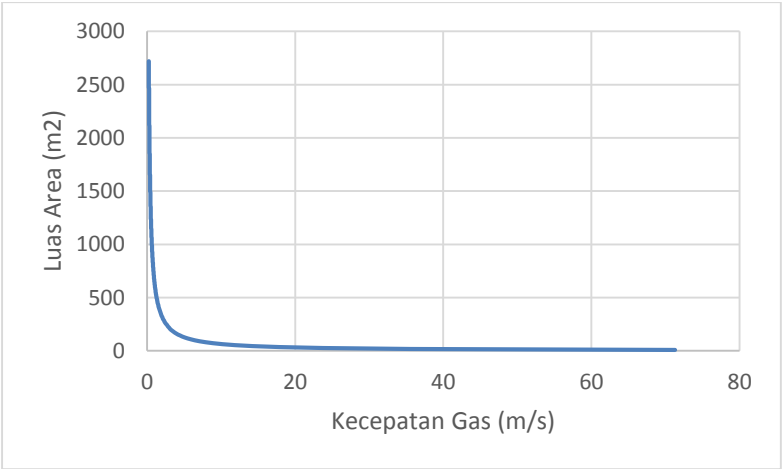
Gambar a. 1. Hubungan Kecepatan Gas dengan Luas Area pada Studi kasus PLTG Muara Tawar menggunakan Zeolite 13x



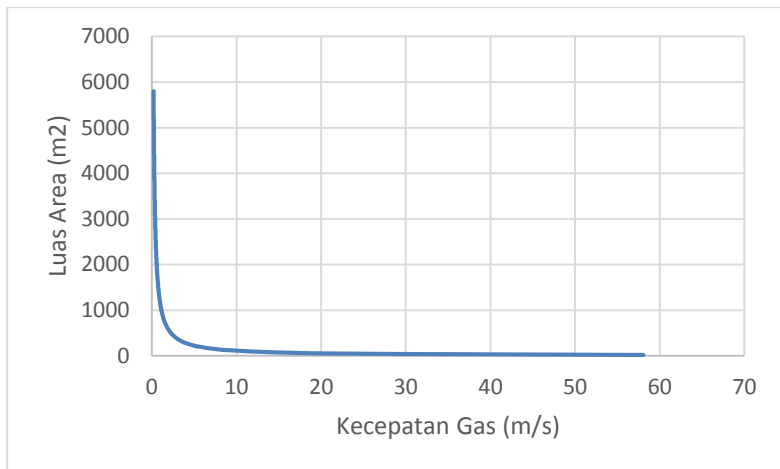
Gambar a. 2. Hubungan Kecepatan Gas dengan Luas Area pada Studi kasus PLTU Paiton menggunakan Zeolite 13x



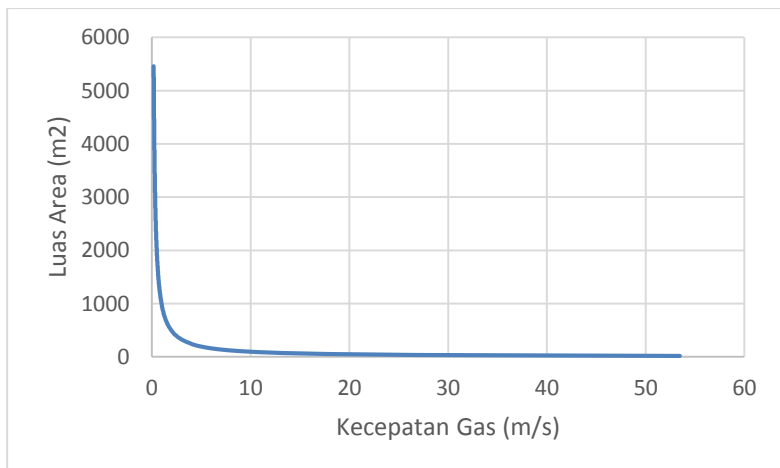
Gambar a. 3.Hubungan Kecepatan Gas dengan Luas Area pada Studi kasus PLTG Muara Tawar menggunakan Zeolite 5a



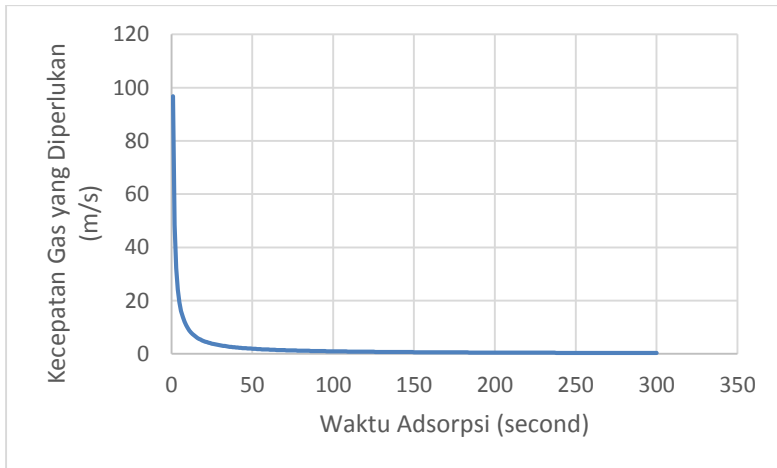
Gambar a. 4.Hubungan Kecepatan Gas dengan Luas Area pada Studi kasus PLTU Paiton menggunakan Zeolite 5a



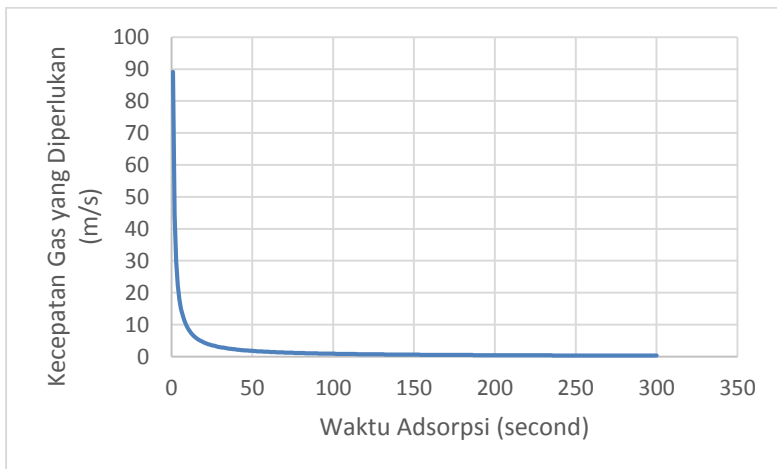
Gambar a. 5. Hubungan Kecepatan Gas dengan Luas Area pada Studi kasus PLTG Muara Tawar menggunakan Zeolite 4a



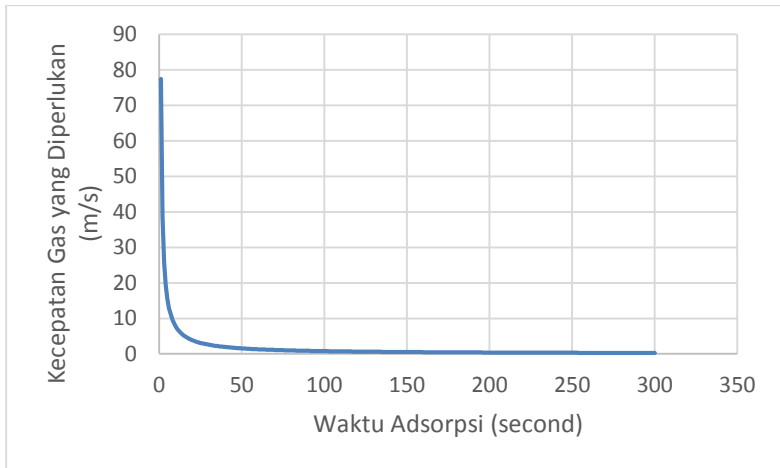
Gambar a. 6. Hubungan Kecepatan Gas dengan Luas Area pada Studi kasus PLTU Paiton menggunakan Zeolite 4a



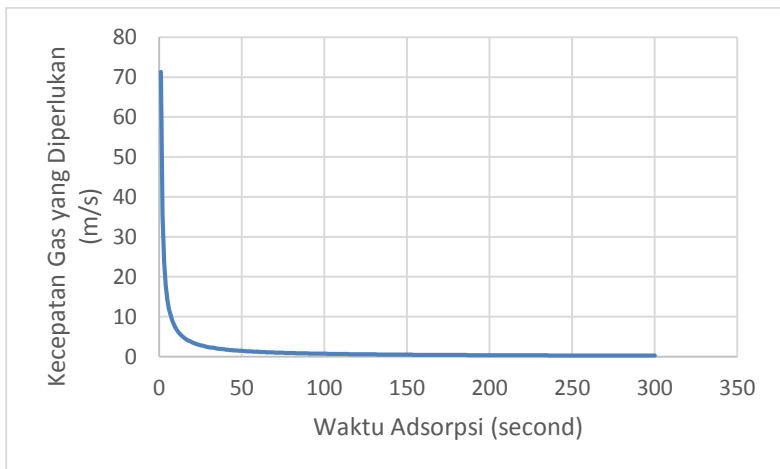
Gambar a. 7. Hubungan Kecepatan yang Dibutuhkan dengan Waktu Adsorpsi pada Studi kasus PLTG Muara Tawar menggunakan Zeolite 13x



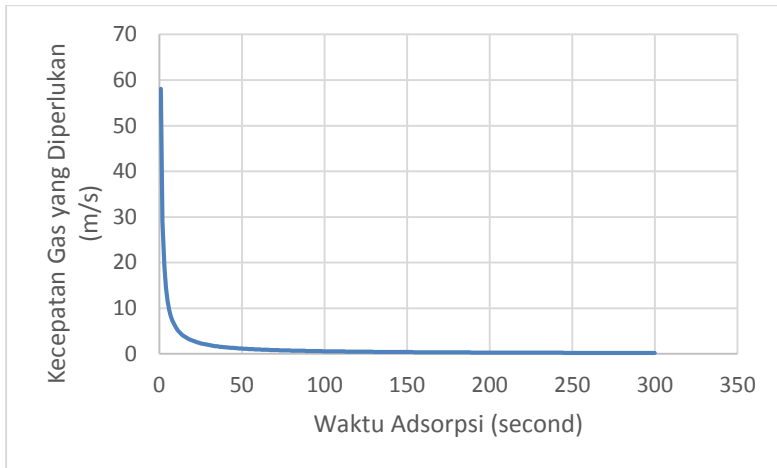
Gambar a. 8. Hubungan Kecepatan yang Dibutuhkan dengan Waktu Adsorpsi pada Studi kasus PLTU Paiton menggunakan Zeolite 13x



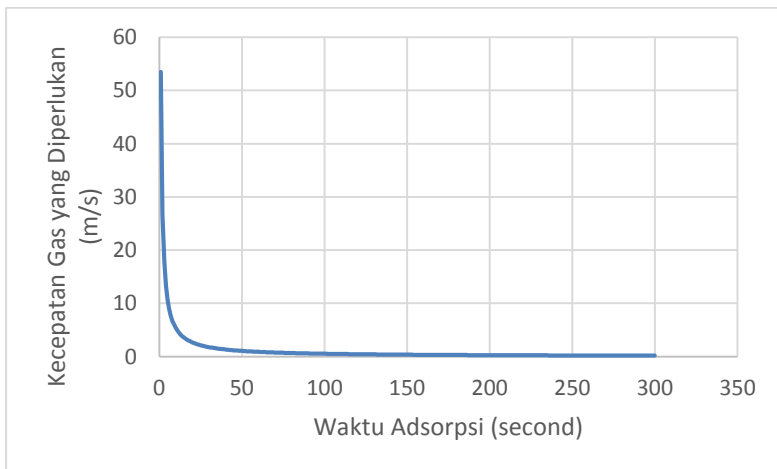
Gambar a. 9. Hubungan Kecepatan yang Dibutuhkan dengan Waktu Adsorpsi pada Studi kasus PLTG Muara Tawar menggunakan Zeolite 5a



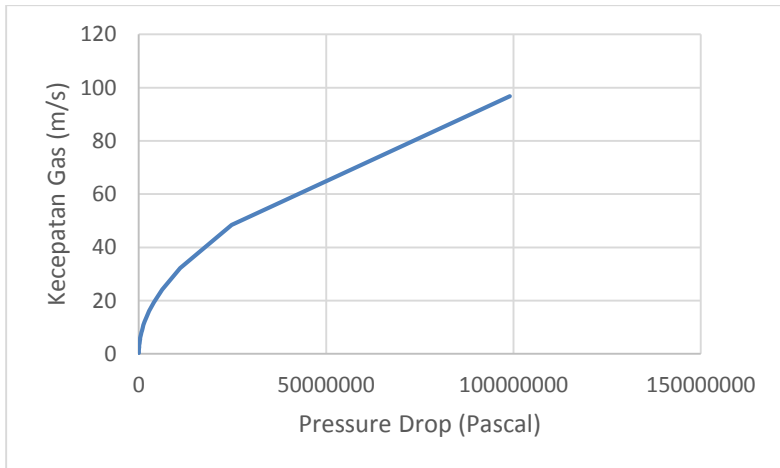
Gambar a. 10. Hubungan Kecepatan yang Dibutuhkan dengan Waktu Adsorpsi pada Studi kasus PLTU Paiton menggunakan Zeolite 5a



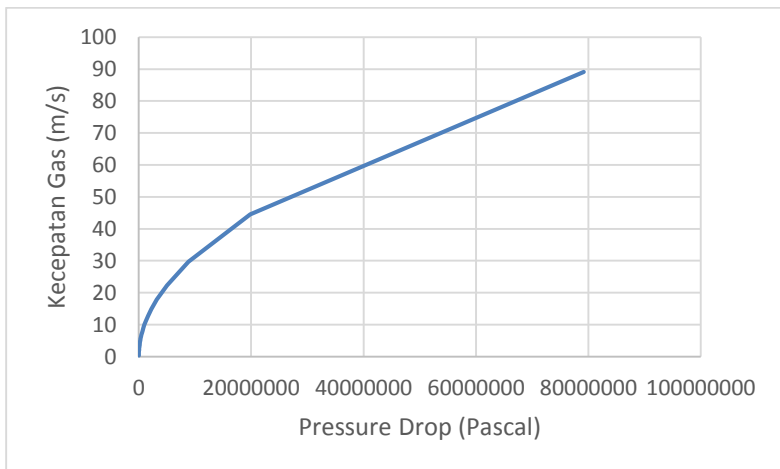
Gambar a. 11. Hubungan Kecepatan yang Dibutuhkan dengan Waktu Adsorpsi pada Studi kasus PLTG Muara Tawar menggunakan Zeolite 4a



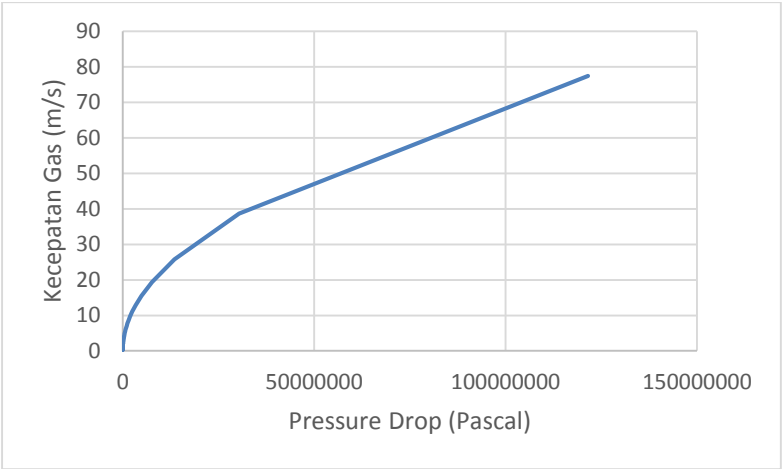
Gambar a. 12. Hubungan Kecepatan yang Dibutuhkan dengan Waktu Adsorpsi pada Studi kasus PLTU Paiton menggunakan Zeolite 4a



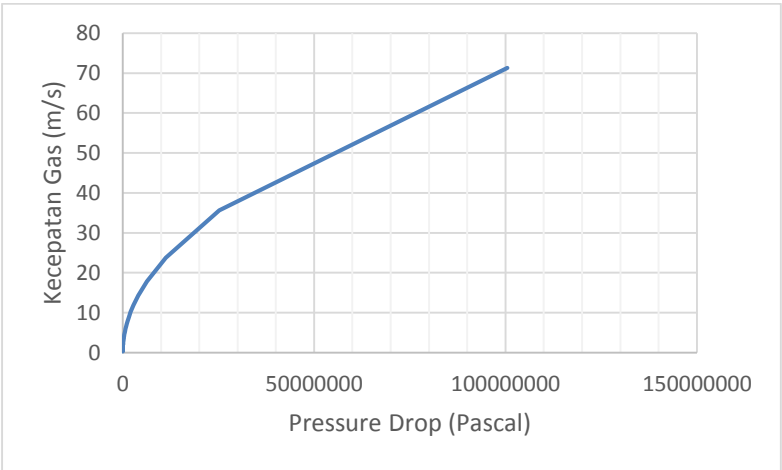
Gambar a. 13. Hubungan Kecepatan Gas dengan *Pressure Drop* yang Terjadi pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar Menggunakan Zeolite 13x



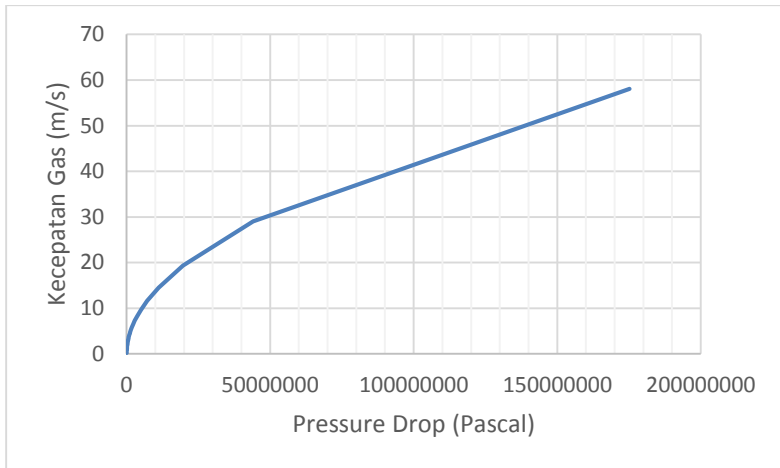
Gambar a. 14. Hubungan Kecepatan Gas dengan *Pressure Drop* yang Terjadi pada Studi Kasus PLTU Paton Menggunakan Zeolite 13x



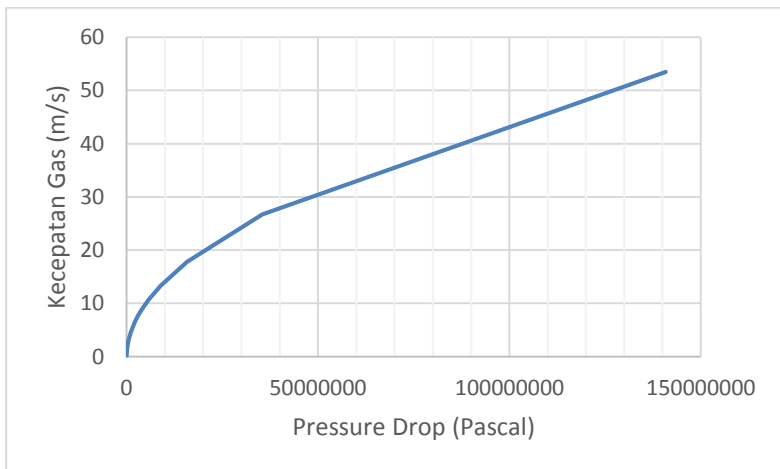
Gambar a. 15.Hubungan Kecepatan Gas dengan *Pressure Drop* yang Terjadi pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar Menggunakan Zeolite 5a



Gambar a. 16.Hubungan Kecepatan Gas dengan *Pressure Drop* yang Terjadi pada Studi Kasus PLTU Paiton Menggunakan Zeolite 5a



Gambar a. 17. Hubungan Kecepatan Gas dengan *Pressure Drop* yang Terjadi pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar Menggunakan Zeolite 4a



Gambar a. 18. Hubungan Kecepatan Gas dengan *Pressure Drop* yang Terjadi pada Studi Kasus PLTU Paiton Menggunakan Zeolite 4a



Gambar a. 19. Hubungan Harga Pembelian Kolom *Pressure Swing Adsorption* dengan Luas Penampang pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar Menggunakan Zeolite 13x



Gambar a. 20. Hubungan Harga Pembelian Kolom *Pressure Swing Adsorption* dengan Luas Penampang pada Studi Kasus PLTU Paiton Menggunakan Zeolite 13x



Gambar a. 21. Hubungan Harga Pembelian Kolom *Pressure Swing Adsorption* dengan Luas Penampang pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar Menggunakan Zeolite 5a



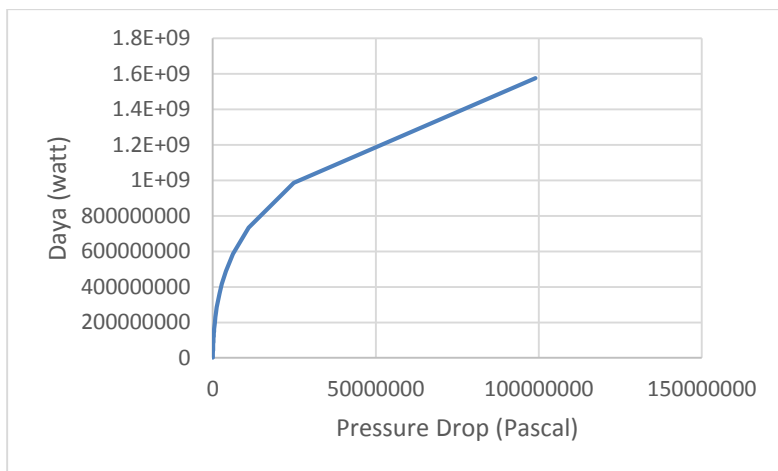
Gambar a. 22. Hubungan Harga Pembelian Kolom *Pressure Swing Adsorption* dengan Luas Penampang pada Studi Kasus PLTU Paiton Menggunakan Zeolite 5a



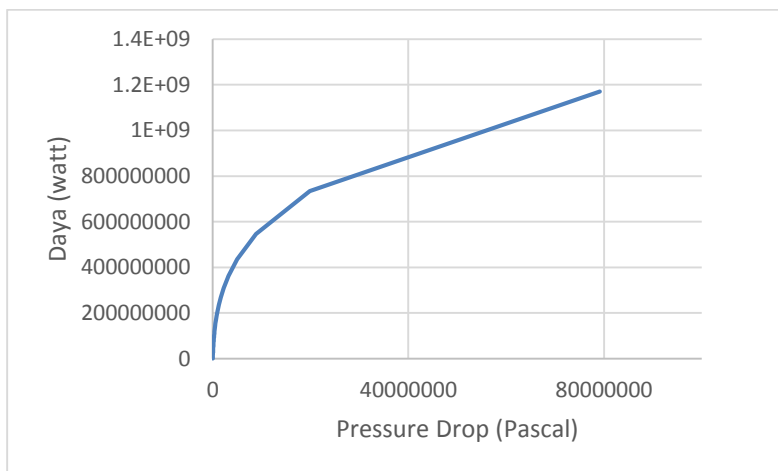
Gambar a. 23. Hubungan Harga Pembelian Kolom *Pressure Swing Adsorption* dengan Luas Penampang pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar Menggunakan Zeolite 4a



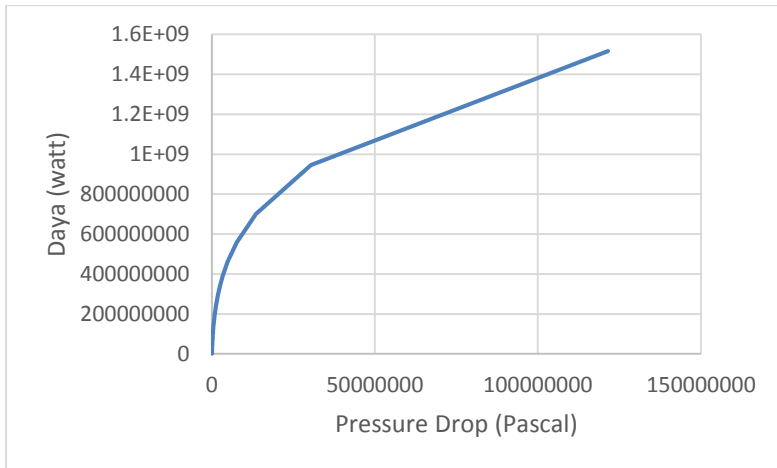
Gambar a. 24. Hubungan Harga Pembelian Kolom *Pressure Swing Adsorption* dengan Luas Penampang pada Studi Kasus PLTU Paiton Menggunakan Zeolite 4a



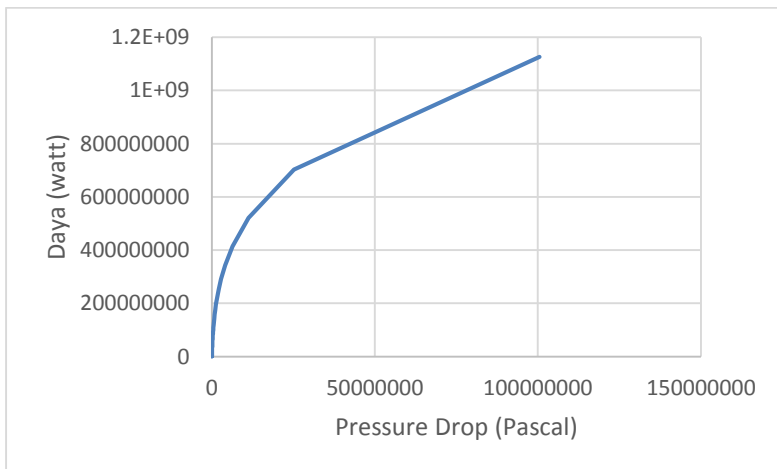
Gambar a. 25. Hubungan *Pressure Drop* dengan Daya yang Dibutuhkan pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar Menggunakan Zeolite 13x



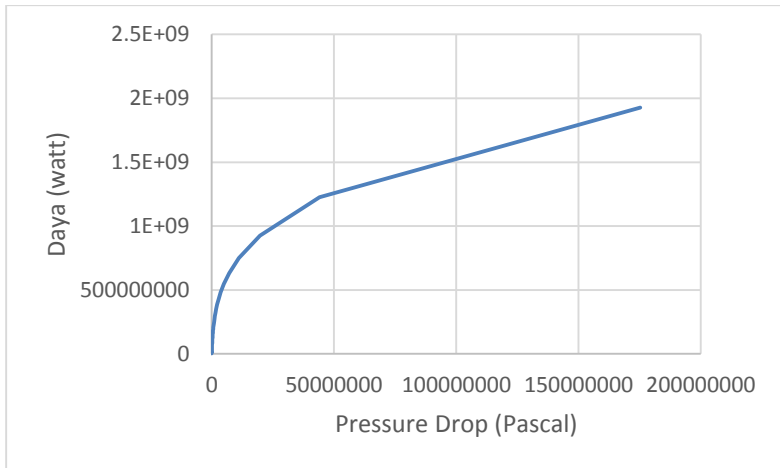
Gambar a. 26. Hubungan *Pressure Drop* dengan Daya yang Dibutuhkan pada Studi Kasus PLTU Paiton Menggunakan Zeolite 13x



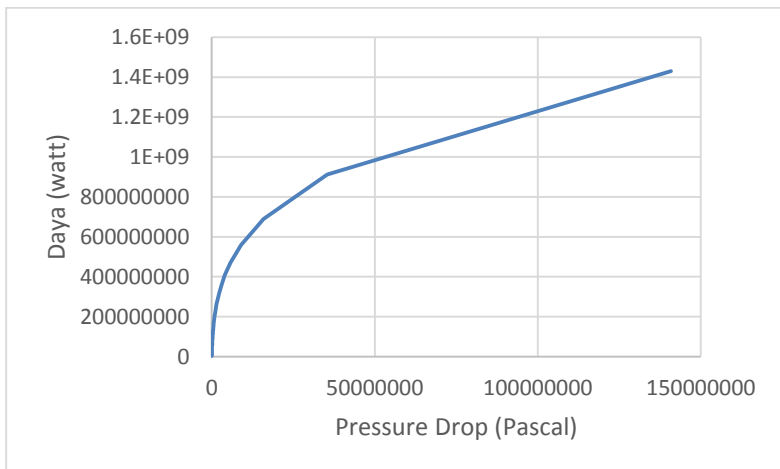
Gambar a. 27.Hubungan *Pressure Drop* dengan Daya yang Dibutuhkan pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar Menggunakan Zeolite 5a



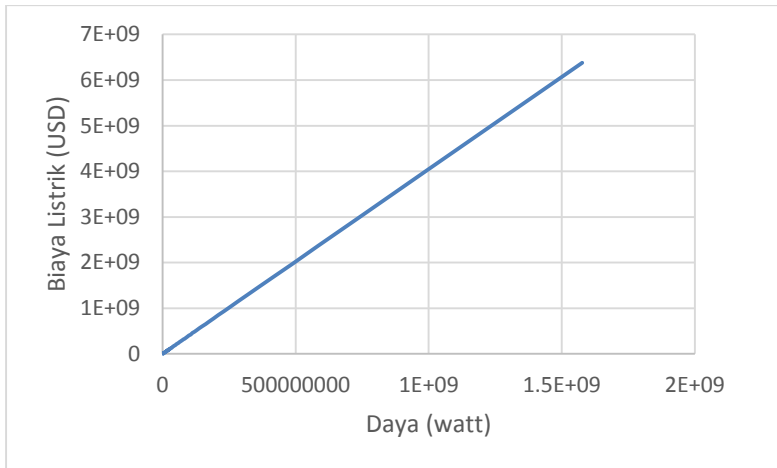
Gambar a. 28.Hubungan *Pressure Drop* dengan Daya yang Dibutuhkan pada Studi Kasus PLTU Paiton Menggunakan Zeolite 5a



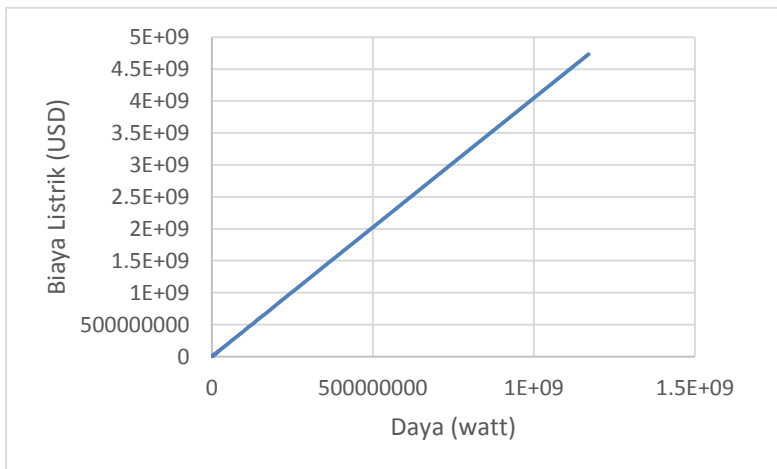
Gambar a. 29. Hubungan *Pressure Drop* dengan Daya yang Dibutuhkan pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar Menggunakan Zeolite 4a



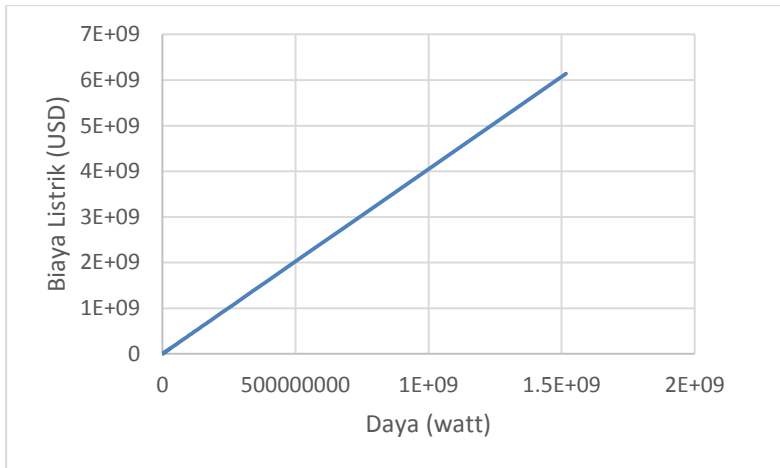
Gambar a. 30. Hubungan *Pressure Drop* dengan Daya yang Dibutuhkan pada Studi Kasus PLTU Paiton Menggunakan Zeolite 4a



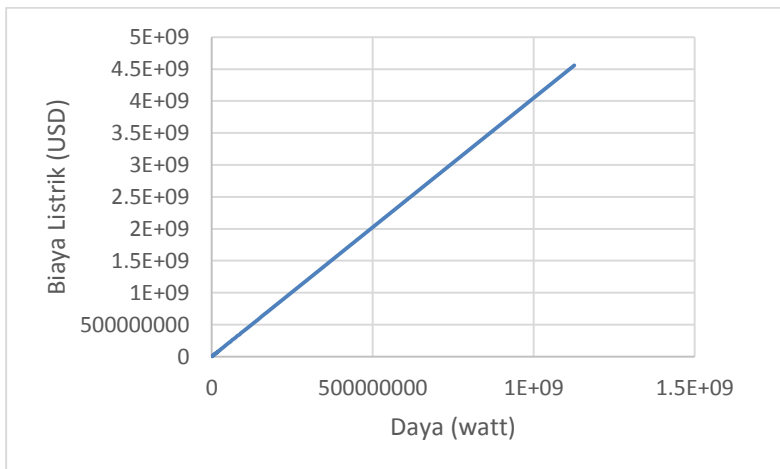
Gambar a. 31. Hubungan Biaya Listrik dengan Daya yang Dibutuhkan pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar Menggunakan Zeolite 13x



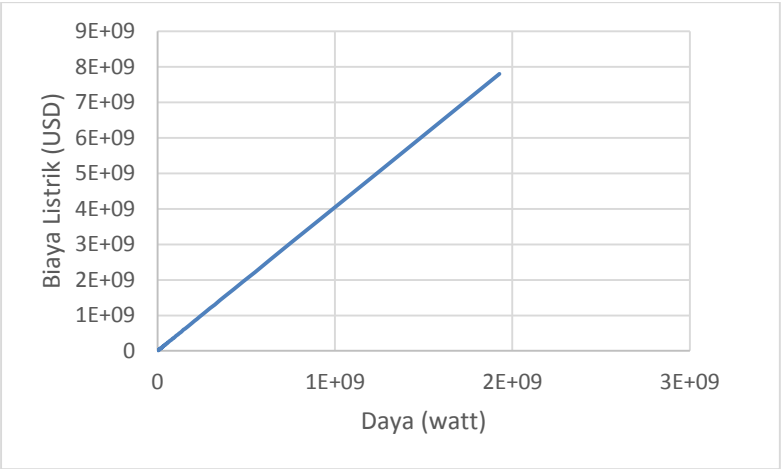
Gambar a. 32. Hubungan Biaya Listrik dengan Daya yang Dibutuhkan pada Studi Kasus PLTU Paiton Menggunakan Zeolite 13x



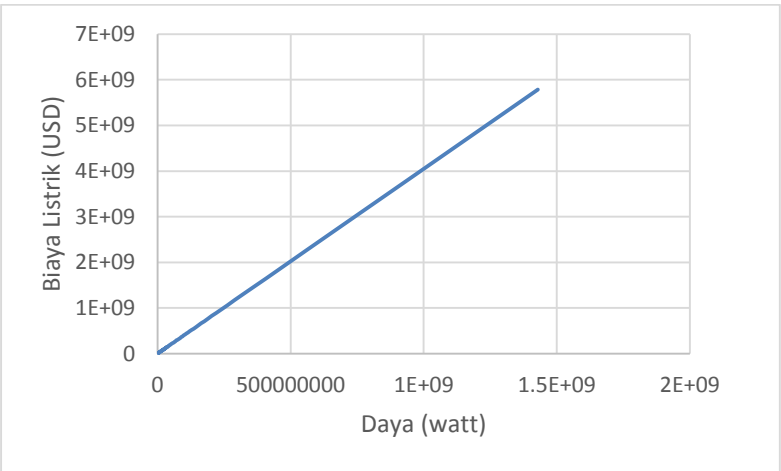
Gambar a. 33. Hubungan Biaya Listrik dengan Daya yang Dibutuhkan pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar Menggunakan Zeolite 5a



Gambar a. 34. Hubungan Biaya Listrik dengan Daya yang Dibutuhkan pada Studi Kasus PLTU Paiton Menggunakan Zeolite 5a



Gambar a. 35.Hubungan Biaya Listrik dengan Daya yang Dibutuhkan pada Studi Kasus PLTG Muara Tawar Menggunakan Zeolite 4a



Gambar a. 36.Hubungan Biaya Listrik dengan Daya yang Dibutuhkan pada Studi Kasus PLTU Paiton Menggunakan Zeolite 4a

Tabel a.2 menunjukkan data desain *pressure swing adsorption* pada studi kasus PLTG Muara Tawar dan PLTU Paiton dengan menggunakan 3 *adsorbent* setelah dilakukan optimasi.

Tabel a. 2. Data Desain *Pressure Swing Adsorption* Setelah Dilakukan Optimisasi

	Zeolite 13x Muara Tawar	Zeolite 13x Paiton	Zeolite 5a Muara Tawar	Zeolite 5a Paiton	Zeolite 4a Muara Tawar	Zeolite 4a Paiton
<i>Profit</i>	243,071,316	356,627,026	187,040,409	279,085,735	90,141,938	208,169,252
<i>PSA Purchase Cost (USD)</i>	70,000,488	61,077,688	62,619,223	52,746,339	127,511,573	109,735,858
<i>Adsorbent Cost (USD)</i>	121,271	147,336	162,893	191,740	573,348	721,805
<i>Compressor Electricity</i>	41,193,913	34,604,832	35,081,674	29,131,953	82,430,197	71,168,457
<i>Blower Cost (USD)</i>	29,322,085	36,383,059	16,215,825	20,249,056	45,187,526	56,321,223
<i>Pump Cost (USD)</i>	84,531,695	87,352,855	71,708,878	79,505,891	150,693,126	158,491,326
<i>Compressor Power (watt)</i>	10,178,575	8,550,483	8,668,306	7,198,194	20,367,619	17,584,963
<i>Blower Power (watt)</i>	7,245,173	8,989,864	4,006,757	5,003,325	11,165,354	13,916,371

<i>Pump Power</i> (Watt)	20,886,876	21,583,955	17,718,496	19,645,054	37,234,657	39,161,509
<i>Surface Area</i> (m ²)	987	861	883	743	1,797	1,547
<i>Adsorbent</i> <i>Mass</i> (kg)	67,373	81,853	81,447	95,870	382,232	481,203
<i>Pressure</i> (atm)	1.10	1.00	1.52	1.43	1.00	0.95
<i>Adsorption</i> <i>Time</i> (s)	90	82	90	82	93	85
<i>Length</i> (m)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
<i>Diameter</i> (m)	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00

Tabel a.3. Optimasi Untuk Penggunaan *Pressure Swing Adsorption* yang Telah Ada (ASCOA)

Studi Kasus	Parameter	Nilai
13x Muara Tawar	<i>Profit</i> (USD)	-229,013,524
	<i>Adsorption time</i> (s)	897.00
	<i>Length</i> (m)	17.00
	<i>Pressure</i> (atm)	1.84
	<i>Diameter</i> (m)	4.00
13x Paiton	<i>Profit</i> (USD)	-59,218,421
	<i>Adsorption time</i> (s)	780.00
	<i>Length</i> (m)	17.00
	<i>Pressure</i> (atm)	1.53
	<i>Diameter</i> (m)	4.00
5a Muara Tawar	<i>Profit</i> (USD)	-234,054,493
	<i>Adsorption time</i> (s)	915.00
	<i>Length</i> (m)	17.00
	<i>Pressure</i> (atm)	2.64
	<i>Diameter</i> (m)	4.00
5a Paiton	<i>Profit</i> (USD)	-350,121,031
	<i>Adsorption time</i> (s)	265.00
	<i>Length</i> (m)	17.00
	<i>Pressure</i> (atm)	2.58
	<i>Diameter</i> (m)	4.00
4a Muara Tawar	<i>Profit</i> (USD)	-703,276,701
	<i>Adsorption time</i> (s)	863.00
	<i>Length</i> (m)	17.00
	<i>Pressure</i> (atm)	1.92
	<i>Diameter</i> (m)	4.00
4a Paiton	<i>Profit</i> (USD)	-493,370,091
	<i>Adsorption time</i> (s)	716.00
	<i>Length</i> (m)	17.00
	<i>Pressure</i> (atm)	1.40
	<i>Diameter</i> (m)	4.00

Untuk studi kasus penambahan instrumen pada teknologi *pressure swing adsorption* digunakan 1 buah PLC, 4 buah *3 way valve*, dan 4 pipa aluminium sepanjang 4 meter dan diameter 0.4 meter (menyesuaikan diameter *3 way valve* yang ada di pasaran) pada tiap pasang *pressure swing adsorption* (1 modul *pressure swing adsorption*).

Tabel a.4. Harga Pembelian Instrumen untuk Satu Modul *Pressure Swing Adsorption*

No	Komponen	USD
1	<i>3 way valve</i>	8,000
2	PLC	49.9
3	Pipa	8,207
	Total	16,257

Sehingga diperoleh *profit* akibat penambahan instrument seperti pada tabel a.5

Tabel a.5. *Profit* Akibat Penambahan Instrumen

Studi Kasus	Jumlah PSA (pasang)	<i>Profit</i> (USD)
PLTG Muara Tawar menggunakan zeolite 4a	143	88,864,818
PLTG Muara Tawar menggunakan zeolite 5a	70	185,926,080
PLTG Muara Tawar menggunakan zeolite 13x	79	241,928,863
PLTU Paiton menggunakan zeolite 4a	123	207,206,924
PLTU Paiton menggunakan zeolite 5a	59	276,759,357
PLTU Paiton menggunakan zeolite 13x	69	354,624,956

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

LAMPIRAN B

B.1. Fungsi Objektif dan Model yang Digunakan untuk Optimisasi Menggunakan *Genetic Algorithm* dan *Duelist Algorithm*

```
function Jtot=function_obj(x)
%Fungsi Obyektif
    t=x(1) ; %time
    L=x(2); %length
    pa=x(3); %tekanan adsorbsi
    d=x(4); %luasan

    th=6; %tahun produksi

    pur=0.99;
    cap=0.9;
    effb=0.75;%efisiensi blower
    effc=0.75;%efisiensi compressor
    effvc=0.75;%efisiensi vacuum pump
    ce=0.000077;%electric cost usd per watt
    y=0.12;%fraksi co2
    r=1;%rasio waktu adsorbsi dan desorbsi
    T=333;

    %berdasarkan adsorbent yang digunakan
    pd=0.25;%pressure desorbsi in atm
    b=0.3;%void particle
    dp=0.002;%diameter partikel

    MC=0.044;
    MN=0.028;
    R=8.314;

    CpC=0.87; %kJ/kg K
    CpN=1.04;
```

```

vN=0.00001936;           %Pa s
vC=0.00001658;

rhoC=MC*pa*101325/(R*T)
rhoN=MN*pa*101325/(R*T)
rhog=(rhoC*y)+(rhoN*(1-y))

%berdasarkan studi kasus
massfC=106.86; %massflowcarbon
massfN=530.13;

f=(massfC/rhoC)+(massfN/rhoN);

myN=MN*1000*(1-y);
myC=MC*1000*y;

myt=myN+myC;
mfN=myN/myt;
mfC=myC/myt;

Rm=R/myt;

Cptot=CpC*mfC+CpN*mfN
Cvtot=Cptot-Rm
k=Cptot/Cvtot

v=((vC*(y)*MC^(0.5)))+(vN*(1-
y)*MN^(0.5)))/(((y)*vC^(0.5))+((1-y)*MN^(0.5)))

x=pur*b*(y-1)/(pur*(cap)-cap); %x=ta/tc
u=x*L/t;
s=f*(1+r)/u;
A=(22/7*((d/2)^2));
pc=10^(3.974+0.4485*(log10(A*L))+0.1074*(log10(A
*L))^2);

c1=4.65*(586/397)*2*(s/A)*pc

```



```

pdr=(150*v*u*((1-
b)^2))/((dp^2)*(b^3))+1.75*rhog*u^2*(1-
b)/(dp*b^3)*L;
pow=((pa*101325)*f*k)/(effb*(k-
1))*(((pa*101325+pdr)/(101325))^(k-1)/k)-1);

c3=pow*th*365*24*ce

```

%CO2 yang dijual (berdasarkan adsorbent yang digubakan)

```
mol=y*f*(pa*101325/(8.314*T))*t;
```

```

yc=45.72*exp(-0.08842*pa)-45.81*exp(-
0.1048*pa);;
mass=mol/(yc);
c2=mass*1.5;

```

```

mold=(mass*yc)-(mass*0.14);
c6=2*mold*31536000*0.000044*30*th/(t*(1+r));

```

```

rhoc=pd*101325*MC/(R*T); %densitas co2
fc=0.044*mold/(rhoc*t) %flow co2
kd=1.28; %heat ratio desorbsi

```

%daya yang dibutuhkan untuk menurunkan tekanan dari tekanan adsorbsi ke desorbsi

```

pow2=(-((pa*101325)*fc*kd)/(effvc*(kd-
1)))*(((pd/pa)^(kd-1)/kd)-1);

```

```
c5=pow2*th*365*24*ce
```

```

u1=fc*(1+r)/s
pdr1=(150*vC*u1*((1-
b)^2))/((dp^2)*(b^3))+1.75*rhoc*u1^2*(1-
b)/(dp*b^3)*L;
pow1=((pd*101325*cap)*fc*kd)/(effc*(kd-
1))*(((101325+pdr1)/(pd*101325))^(kd-1)/kd)-
1);
c4=pow1*th*r*365*24*ce

```

```
if c1<0
    c6=0
    c1=-c1
end
if c2<0
    c6=0
    c2=-c2
end
if c3<0
    c6=0
    c3=-c3
end
if c4<0
    c6=0
    c4=-c4
end
if c5<0
    c6=0
    c5=-c5
end
%Sehingga
Jtot=(c6-c1-c2-c3-c4-c5);
end
```

B.2. Fungsi Objektif dan Model yang Digunakan untuk Optimisasi Menggunakan *Particle Swarm Optimization*, *Rain Water*, dan *Killer Whale Algorithm*

```
function fit=function_objmin(x)
%Fungsi Obyektif
    t=x(1) ; %time
    L=x(2); %length
    pa=x(3); %tekanan adsorbsi
    d=x(4); %luasan

    th=6; %tahun produksi

    %hargakolom
    pur=0.99;
    cap=0.9;
    effb=0.75;
    effc=0.75;
    effvc=0.75;
    ce=0.000077;
    %electric cost usd per watt hour (idr 1026/kwh)
    y=0.12;
    %fraksi co2
    r=1;
    %rasio waktu adsorbsi dan desorbsi
    T=333;

    pd=0.25;
    %pressure desorbsi in atm
    b=0.3;
    %void particle
    dp=0.002;
    %diameter partikel DICARI!!!!

    % rhog=1.537;
    %rho gas campuran CO2 dan N2

    MC=0.044;
    MN=0.028;
```

```

R=8.314;

CpC=0.87;           %kJ/kg K
CpN=1.04;

vN=0.00001936;      %Pa s
vC=0.00001658;

rhoC=MC*pa*101325/(R*T)
rhoN=MN*pa*101325/(R*T)
rhog=(rhoC*y)+(rhoN*(1-y))

massfC=106.86; %massflowcarbon
massfN=530.13;

f=(massfC/rhoC)+(massfN/rhoN);

myN=MN*1000*(1-y);
myC=MC*1000*y;           %MC
dan MN dibuat kg/kmol
myt=myN+myC;
mfN=myN/myt;
mfC=myC/myt;

Rm=R/myt;

Cptot=CpC*mfC+CpN*mfN
Cvtot=Cptot-Rm
k=Cptot/Cvtot

% k=1.38;
%heat ratio

v=((vC*(y)*MC^(0.5))+(vN*(1-
y)*MN^(0.5)))/(((y)*vC^(0.5))+((1-y)*MN^(0.5)))

% v=0.0000193742;
%viskositas

```

```

x=pur*b*(y-1)/(pur*(cap)-cap); %x=ta/tc
u=x*L/t;
s=f*(1+r)/u;
A=(22/7*((d/2)^2));
pc=10^(3.974+0.4485*(log10(A*L))+0.1074*(log10(A
*L))^2);
c1=4.65*(586/397)*2*(s/A)*pc

%power blower
pdr=(150*v*u*((1-
b)^2))/((dp^2)*(b^3))+1.75*rhog*u^2*(1-
b)/(dp*b^3)*L;
pow=((pa*101325)*f*k)/(effb*(k-
1))*(((pa*101325+pdr)/(101325))^(k-1)/k)-1);
c3=pow*th*365*24*ce

%hargajualCO2
mol=y*f*(pa*101325/(8.314*T))*t;

yc=45.72*exp(-0.08842*pa)-45.81*exp(-
0.1048*pa);;
mass=mol/(yc);
c2=mass*1.5;

mold=(mass*yc)-(mass*0.14);
c6=2*mold*31536000*0.000044*30*th/(t*(1+r));

rhoc=pd*101325*MC/(R*T); %densitas co2
fc=0.044*mold/(rhoc*t) %flow co2
kd=1.28; %heat ratio desorbsi

%daya yang dibutuhkan untuk menurunkan tekanan
dari tekanan adsorbsi ke
%desorbsi
pow2=(-((pa*101325)*fc*kd)/(effvc*(kd-
1)))*(((pd/pa)^(kd-1)/kd)-1);
c5=pow2*th*365*24*ce

```

```

        u1=fc*(1+r)/s
        pdr1=(150*vC*u1*((1-
b) ^2))/((dp^2)*(b^3))+1.75*rhoc*u1^2*(1-
b)/(dp*b^3)*L;
        pow1=(( (pd*101325*cap)*fc*kd)/(effc*(kd-
1)))*(((101325+pdr1)/(pd*101325)) ^((kd-1)/kd))-
1);
        c4=pow1*th*r*365*24*ce

if c1<0
        c6=0
        c1=-c1
end
if c2<0
        c6=0
        c2=-c2
end
if c3<0
        c6=0
        c3=-c3
end
if c4<0
        c6=0
        c4=-c4
end
if c5<0
        c6=0
        c5=-c5
end
%Sehingga
        Jtot=(c6-c1-c2-c3-c4-c5);

if Jtot <= 0
        Jtot=1
end
fit=1/Jtot
end

```

BIODATA PENULIS



Nama Penulis Kevin Sanjoyo Gunawan, dilahirkan di Nganjuk, 14 Mei 1995. Menempuh pendidikan formal di SDK Yos Sudarso Kertosono pada 2001 – 2007, dilanjutkan di SMPN 1 Kertosono pada 2007 - 2010, dan pada tahun 2010 memasuki jenjang SMA di SMAN 1 Kertosono. Setelah lulus dari pendidikan SMA, penulis melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik

Fisika, Program Studi S1 Teknik Fisika pada tahun 2013 hingga 2017. Di jurusan Teknik Fisika penulis mengambil tugas akhir di bidang instrumentasi dengan judul optimasi desain pressure swing adsorption sebagai carbon capture pada studi kasus PLTU Paiton dan PLTG Muara Tawar di bawah bimbingan Totok Ruki Biyanto, Ph.D. Apabila terdapat pertanyaan dan saran tentang penelitian penulis silahkan menghubungi e-mail penulis yaitu: kevin-sanjoyo14@gmail.com.